REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Système de Télécommunications

Étude et implémentation d'un système intelligent de localisation des objets communicants dans un réseau de capteurs sans fil

Présentés par :

Bouziani Anis

Cherifi Youcef

Proposés et Dirigés par :

Bengherbia Billel

Tobbal Abdelhafid

Promotion 2023

Remerciement

En premier lieu, nous remercions **« DIEU »** le Tout-Puissant qui nous a donné la force pour l'élaboration de ce travail.

• Nous voulons exprimer notre gratitude, notre reconnaissance et nos profonds remerciements à notre Encadreur, Monsieur « **BENGHERBIA Billel »**, pour sa disponibilité et ses précieux conseils qui ont permis à ce travail de voir le jour, 'Merci beaucoup'.

• Nous adressons nos remerciements à notre Co-Encadreur **« TOBBAL Abdelhafid»** pour son aide précieuse, son soutien et ses conseils qui ont été bénéfiques dans la réalisation de ce mémoire.

• Nous exprimons notre gratitude spéciale envers les membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

• En dernier lieu, il est essentiel d'exprimer notre gratitude envers tous les enseignants qui ont joué un rôle crucial dans notre parcours éducatif. Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude infinie à nos parents pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Dédicace

Je dédie ce travail

A ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne,

Leur encouragement a fait de moi ce que je suis aujourd'hui :

Particulièrement à mes parents pour l'effort qui vous avez suscité en moi, de par sa rigueur.

A mes frères, ceci est ma profonde gratitude pour leurs éternel amour, que ce rapport soit les meilleurs cadeaux qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Également je voudrais remercier mon cousin Abde Alhak pour avoir fait les tests sur l'échantillon pour ce projet

BOUZIANI Anis

Dédicace

À ma famille, qui m'a soutenu tout au cours de cette aventure académique et qui a été ma source constante d'encouragement et d'amour. Votre soutien inconditionnel a été essentiel pour moi.

A mes chers parents Rabah et Nabia, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A ma chère sœur Amina pour leur encouragement permanent, et leur soutien moral,

A mes chers frères Riadh et Aissa et leurs femmes pour leur appui et leur encouragement,

A tous les enfants sans Oublier Ritadj, Mohamed Amir et Maissa

A toutes mes amis

A mes très chers oncles et tantes des deux familles Cherifi et Ouadah

A tous les morts, surtout mon grand-père Mohamed, ma grand-mère Kelthom et mes oncles maternels, que Dieu ait pitié d'eux tous

Sans oublier tous les enseignants qui ont contribué à notre formation depuis le primaire à ce jour

A toutes

Merci d’être toujours là pour moi.

CHERIFI Youcef

ملخص

في هذا المشروع، أجرينا تقييمًا لتحديد دقة الموقع في البيئة الخارجية باستخدام شبكات الاستشعار اللاسلكية. أنشأنا شبكة استشعار لاسلكية تتكون من أربعة أنواع من عقد الاستشعار على أساس منصات ESP32 وجهاز إرسال LoRa. استخدمنا وحدة اتصالات LoRa في بنية العقدة لقياس RSSI، مما يساعدنا على تقدير المسافة والموقع. لقد طورنا نموذجين للشبكة العصبية لتقدير الإحداثيات: يستخدم النموذج الأول الشبكات العصبية لتقدير المسافات، والتي تُستخدم بعد ذلك لتحديد الإحداثيات من خلال تعدد الأطراف، بينما يستخدم النموذج الثاني شبكة عصبية لتحديد الموقع مباشرة. في مساحة 360 م × 360 م، حصلنا في النموذج الأول على خطأ 60 م، بينما الخطأ في النموذج الثاني هو 40 م. مما سمح لنا ذلك بمقارنة نتائج النموذجين في اختيار الطريقة الأنسب للتطبيقات المستقبلية.

الكلمات المفتاحية: الموقع، RSSI،LoRa ،RCSF ، الذكاء الاصطناعي، متعدد الأطراف، ANN.

Résumé

Dans ce projet, nous avons effectué une évaluation pour déterminer la précision de la localisation dans l'environnement extérieur à l'aide de réseaux de capteurs sans fil. Nous avons créé un réseau de capteurs sans fil composé de quatre types de nœuds de capteurs basés sur des plates-formes ESP32 et un émetteur LoRa. Nous avons utilisé le module de communication LoRa dans l'architecture du nœud pour mesurer RSSI, ce qui nous aide à estimer la distance et la position. Nous avons développé deux modèles de réseaux de neurones pour l'estimation des coordonnées : le premier modèle utilise des réseaux de neurones pour estimer les distances, qui sont ensuite utilisées pour déterminer les coordonnées par multilatération, tandis que le deuxième modèle utilise un réseau de neurones pour déterminer directement la position. Dans une zone de 360m x 360m, le premier modèle, nous avons obtenu une erreur de 60m, tandis que le deuxième modèle avait une erreur de 40m. Cela nous a permis de comparer les résultats des deux modèles en choisissant la méthode la plus appropriée pour les applications futures.

Mots clé : localisation, RSSI, RCSF, LoRa, intelligence artificiel, multilatération, ANN.

Abstract

In this project, we carried out an evaluation to determine the accuracy of localization in the outdoor environment using wireless sensor networks. We created a wireless sensor network consisting of four types of sensor nodes based on ESP32 platforms and a LoRa transmitter. We used the LoRa communication module in the node architecture to measure RSSI, which helps us estimate distance and position. We have developed two neural network models for coordinate estimation: the first model uses neural networks to estimate distances, which are then used to determine coordinates by multilateration, while the second model uses a neural network to determine position directly. In an area of 360m x 360m, the first model gave an error of 60m, while the second model had an error of 40m. This enabled us to compare the results of the two models, choosing the most appropriate method for future applications.

Keywords : localization, RSSI, WSN, LoRa, deep learning, multi-lateration, ANN.

Table des matières

Remerciement……..II
Dédicace……...III
Résumé……...V
Liste des Tableaux.....X
Liste des Figures.....XI
Liste des Abréviations……...XII
Introduction générale……..……1

Chapitre I: Les réseaux de capteurs sans fil

I.1 Introduction 3
I.2 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) 3
I.2.1 Définition de RCSFs 3
I.2.2 Architecture d'un nœud de capteur sans fil 3
I.2.2.1 Unité d'acquisition 3
I.2.2.2 Unité de traitement 4
I.2.2.3 Unité de communication 4
I.2.2.4 Unité d'alimentation 4
I.2.3 Caractéristiques 4
I.2.3.1 Coût réduit 4
I.2.3.2 Efficacité énergétique 4
I.2.3.3 Puissance de calcul 5
I.2.3.4 Capacités de communication 5
I.2.3.5 Sécurité et confidentialité 5
I.2.3.6 Détection et traitement distribués 5
I.2.3.7 La tolérance aux pannes 5
I.2.3.8 La topologie du réseau dynamique 6
I.2.3.9 Auto-organisation 6
I.2.3.10 Communication multi-sauts 6
I.2.3.11 Petite taille physique 6
I.2.4 Application 6
I.3 Technologie de communication dans les réseaux de capteurs sans fil 7
I.3.1 Technologie Wifi 7
I.3.1.1 Définition 7
I.3.1.2 Les normes de Wifi 7
I.3.1.3 Les avantages de wifi [13] 8
I.3.2 Technologie Bluetooth 8
I.3.2.1 Définition 8
I.3.2.2 Portée 8
I.3.2.3 Les avantages [15] [16] 9

Table des matières

I.3.2.4 Les inconvénients [16] 9
I.3.3 Technologie Zigbee 9
I.3.3.1 Définition 9
I.3.3.2 Types de périphériques logiques ZigBee [18] 9
I.3.3.3 Les avantages [19] 10
I.3.3.4 Les inconvénients [20] 10
I.4 Les réseaux LPWAN 10
I.4.1 Définition 10
I.4.2 Comparaison avec les autres types de réseaux 11
I.5 La technologie LoRa 12
I.5.1 Définition 12
I.5.2 Historique 12
I.5.3 Modulation LoRa (couche physique) 12
I.5.4 Le Chirp [27] 12
I.5.5 Durée d'émission d'un symbole 14
I.5.6 Le facteur d'étalement (spreading factor) 14
I.5.7 Taux de codage (Coding rate) 15
I.5.8 Le Time on Air 16
I.5.9 Débit binaire en LoRa 16
I.5.10 Les différents types de modules LoRa 17
I.5.10.1 Module LoRa (RFM95W) 17
I.5.10.2 Module LoRa (RN2903) 17
I.5.10.3 Module LoRa (SX1278) 17
I.6 Conclusion 18

Chapitre 2:Généralités sur la localisation et les réseaux de neurone

II.1 Introduction 25
II.2 Techniques de localisation dans les réseaux de capteurs sans fil 25
II.2.1 Localisations par temps d'arrivée (TOA) 25
II.2.1.1 Les Avantages [34] 25
II.2.1.2 Les inconvénients [34] 26
II.2.2 Localisations par l'angle d'arrivée (AOA) 26
II.2.2.1 Les Avantages [34] 27
II.2.2.2 Les inconvénients [34] 27
II.2.3 Localisations par la différence du temps d'arrivée (TDoA) 27
II.2.3.1 Les Avantages [34] 27
II.2.3.2 Les inconvénients [34] 27

Table des matières

II.2.4 Localisation par RSSI 27
II.2.4.1 Le modèle d'atténuation : 28
II.2.4.2 La variation de la puissance à une distance donnée : 28
II.2.4.3 Les Avantages [34] 28
II.2.4.4 Les inconvénients [34] 28
II.2.5 Localisation hybride 29
II.2.6 Dérivation des positions 29
II.2.6.1 La trilatération 29
II.2.6.2 Triangulation 30
II.2.6.3 La Multilatération 31
II.2.7 Bilan sur les méthodes de dérivation de positions 31
II.3 Réseau de neurones 32
II.3.1 Introduction 32
II.3.2 Définition 32
II.3.3 Réseaux de neurones biologiques 33
II.3.3.1 Caractéristiques 33
II.3.3.2 Structure 33
II.3.4 Réseaux de neurones formels 34
II.3.5 Correspondance neurone biologique/formel 35
II.3.6 Fonction d'activation 36
II.3.6.1 Fonction Linéaire 36
II.3.6.2 Fonction Sigmoïde 36
II.3.6.3 Fonction d'unité linéaire rectifiée (ReLU) 37
II.3.6.4 Fonction Softmax 38
II.3.6.5 Fonction Tangente Hyperbolique 38
II.3.7 Architecture des réseaux de neurones 39
II.3.7.1 Réseau de neurones non bouclé (feed-forward) 39
II.3.7.2 Réseau de neurones bouclé (feed-back) 39
II.3.8 Apprentissage des réseaux de neurones 40
II.3.8.1 Définition 40
II.3.8.2 Type d'apprentissage 40
II.3.8.2.1 Apprentissage supervisé 40
II.3.8.2.2 Apprentissage non supervisé 41
II.3.8.2.3 Apprentissage renforcé 42
II.3.9 Algorithme d'apprentissage 42
II.3.9.1 L'algorithme de la rétro-propagation du gradient : (back-propagation) 42

Table des matières

II.3.9.2 Fonction Coût (Cost Function) 43
II.3.9.3 L'algorithme de descente de gradient 43
II.3.10 Applications 44
II.3.11 Les avantages et les inconvénients de réseaux de neurone 45
II.4 Conclusion 45
Chapitre 3: Conception et implémentation du système de localisation
III.1 Introduction 46
III.2 Présentation du moyen hardware et software : 46
III.2.1 Architecture du système : 46
III.2.2 Schéma bloc des nœuds 47
III.2.3 Le microcontrôleur ESP32 47
III.2.3.1 Description de l'ESP32 47
III.2.3.2 Les caractéristiques techniques 48
III.2.3.3 Brochage de la carte de développement ESP32 49
III.2.4 Comparaison des caractéristiques techniques d'ESP32 50
III.2.5 Module LoRa : le composant SX1278 52
III.2.5.1 Caractéristiques techniques 52
III.2.5.2 Broches du module 53
III.2.5.3 Choix d'antenne 54
III.2.5.4 Antenne quarte de pôle chargé et dipôle 54
III.2.6 L'interface SPI 56
III.2.7 L'interface I2C 57
III.2.8 Écran OLED SSD1306 58
III.2.8.1 Caractéristiques 58
III.2.9 Réalisation matérielle 59
III.3 Logiciels et outils de programmation 59
III.3.1 Environnement de développement d'Arduino 59
III.3.1.1 Programmer ESP32 avec Arduino 60
III.3.1.2 Téléchargement des bibliothèques nécessaires (LoRa) 62
III.3.2 Node-RED et serveur flowforge 63
III.3.2.1 Node-RED 63
III.3.2.2 Présentation 63
III.3.2.3 Serveur flowforge 64
III.3.3 Le protocole MQTT 64
III.3.3.1 Définition 64
III.3.3.2 Mode de fonctionnement MQTT 65

Table des matières

III.3.3.3 Abonnements et Publications 65
III.4 Fonctionnement du système de collecte 66
III.4.1 Programmation des nœuds 66
III.4.2 Positionnement des nœuds 68
III.4.3 Collecte de données 69
III.5 Développement du système de localisation intelligent 72
III.5.1 Analyse des données 72
III.5.2 Choix de l'algorithme L'AI de localisation 74
III.5.3 Estimation des coordonnées (x, y) 75
III.5.4 Préparation des données 76
III.5.4.1 Importation des bibliothèques 76
III.5.4.2 Chargement de données depuis un fichier Excel avec Pandas 77
III.5.4.3 Traitements de données pour le modèle de réseau de neurones 77
III.5.4.4 Construction et l'entraînement du model 78
III.5.4.5 Affichage des résultats d'entraînement 79
III.5.4.6 Test expérimentale et résultats 81
III.6 Conclusion 82
Bibliographie .....

Annexe

Annexe A……..i
Annexe B…….ii
Annexe C…….iii

Liste des tableaux

Tableau I-1 : les normes de la technologie Wifi 7
Tableau I-2 : la portée de la technologie Bluetooth 8
Tableau I-3 : LoRa Spreading Factors [38] 15

Tableau II- 1 : Comparaison entre les méthodes d'estimaion de distance 29
Tableau II- 2 : Comparaison des méthodes de dérivation de positions 32
Tableau II- 3 : Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel 35

Tableau III- 1 : Comparaison des caractéristiques techniques 51
Tableau III- 2 : Positionnement des nœuds 69
Tableau III- 3 : L'erreur moyenne absolue 80

Liste des figures

Figure I- 1 : Architecture d'un capteur sans fil 3
Figure I- 2 : Comparaison entre les réseaux de communications sans fil [22] 11
Figure I- 3 : Signal Chirp généré sur Matlab (A = 1, F0 = 25 Hz, ΔF = 50 Hz) 13
Figure I- 4 : Bande passante pour la transmission LoRa [27] 13
Figure I- 5 : Temps d'émission d'un symbole [27] 14
Figure I- 6 : Time on Air d'une trame LoRa 16

Figure II- 1 : Mesure de l'AoA par un réseau de capteurs 26
Figure II- 2 : Principe de la trilatération 30
Figure II- 3 : Principe de triangulation 30
Figure II- 4 : Représentation schématique d'un neurone biologique 34
Figure II- 5 : La représentation schématique d'un neurone artificiel 34
Figure II- 6 : Fonction Linéaire 36
Figure II- 7 : Fonction Sigmoïde 37
Figure II- 8 : Fonction d'unité linéaire rectifiée (ReLU) 38
Figure II- 9 : Fonction Tangente Hyperbolique 39
Figure II- 11 : Réseau non bouclé à connexions partielles 39
Figure II- 10 : Réseau non bouclé à connexions totale 39
Figure II- 12 : Réseau non bouclé à connexions partielles 40
Figure II- 13 : Apprentissage supervisé 41
Figure II- 14 : Détails des apprentissages supervisés et non supervisé 42
Figure II- 15 : Illustration du principe de rétro-propagation 43
Figure II- 16 : Optimisation de la fonction coût par descente de gradient 44

Figure III- 1 : Architecture d'un réseau de capteur 46
Figure III- 2 : Schéma du bloc des nœuds 47
Figure III- 3 : Modèle ESP32 (WROOM-32) 47
Figure III- 4 : Schéma fonctionnel ESP32 49
Figure III- 5 : Pinout de l'ESP32 WROOM-32 49
Figure III- 6 : Le module LoRa[65] 52
Figure III- 7 : diagramme de rayonnement en (3D et 2D) 54
Figure III- 8 : S11 en fonction de la fréquence 54
Figure III- 9 : Diagramme de rayonnement de L'antenne dipôle en (3D et 2D) 55
Figure III- 10 : S11 en fonction de la fréquence de L'antenne dipôle 55
Figure III- 11 : Diagramme de rayonnement de l'antenne quart de pôle chargée en (3D et 2D) 56
Figure III- 12 : S11 en fonction de la fréquence de l'antenne quarte de pôle chargée 56
Figure III- 13 : L'interface communication SPI 57
Figure III- 14 : L'interface de communication I2C 57
Figure III- 15 : Écran OLED 58
Figure III- 16 : La carte de noeud mobile 59
Figure III- 17 : L'interface Arduino IDE 60
Figure III- 18 : La boite de dialogue préférence 61
Figure III- 19 : Téléchargement du soft de programmation de l'Esp32 61

Liste des figures

Figure III- 20 : Type de carte utilisé 62
Figure III- 21 : Téléchargements des bibliothèques (LoRa) 62
Figure III- 22 : Logo de Node -Red 63
Figure III- 23 : L'Interface de Node-RED 64
Figure III- 24 : Logo flow forge 64
Figure III- 25 : Fonctionnement du protocole MQTT 65
Figure III- 26 : L'organigramme simplifie de programme de nœud émetteur mobile 66
Figure III- 27 : Machine à états de nœuds mobiles 67
Figure III- 28 : Machine à états de nœuds fixe 68
Figure III- 29 : l'emplacement des nœuds 69
Figure III- 30 : Protocole de communication du nœud mobile avec une base station 70
Figure III- 31 : les données registrent sur Node Red 70
Figure III- 32 : Les données collectées 71
Figure III- 33 : La carte de campus universitaire d'Ouzera 71
Figure III- 34 : Nuage de points de base station 1 et 2 73
Figure III- 35 : Nuage de points de base station 3 et 4 73
Figure III- 36 : Heatmap de la base station 1 et 2 74
Figure III- 37 : Heatmap de la base station 3 et 4 74
Figure III- 38 : Modèle ANN pour Méthode 1 75
Figure III- 39 : Modèle ANN pour Méthode 2 75
Figure III- 40 : Le diagramme de code source pour le modèle prédictif de coordonnées 76
Figure III- 41 : Importation des bibliothèques nécessaires 77
Figure III- 42 : Chargement de base donnée 77
Figure III- 43 : Traitements de données pour le modèle de réseau de neurones 78
Figure III- 44 : Construction d'un modèle 78
Figure III- 45 : Résultats de l'entraînement et de test. 79

Liste abréviations

ADC Analogue to Digital Converter

AI Intelligence artificial

ANN Artificial neural networks

AOA Angle of Arrival

BW Bandwidth

CAT-M1 Category M1

Chirp Compressed High Intensity Radar Pulse

CR Code Rate

CSS Chirp Spread Spectrum

CPU Central Processing Unit

dB Decibel

dBm decibel milliwatts

GPS Global Positioning System

GND Ground

GSM Global System for Mobile communication

GPIO General Purpose input output

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT Internet of things

IDE Environnement de développement intégré

I2C Inter-Integrated Circuit

LAN Local Area Network

LoRa Long Range

LoRaWAN Long Range Wide Area Network

LOS Line Of Sight

Liste abréviations

LPWAN Low Power Wide Area Networks

M2M Machine to machine

MISO Master In Slave Out

MOSI Master Out Slave In

MQTT Message Queuing Telemetry Transport

NB-IoT NarrowBand-Internet of Things

NFC Near Field Communication

OLED Organic Light Emitting Diode

RCSF Réseaux de Capteurs Sans Fil

ReLU Rectified Linear Unit

RF Radio-fréquence

RFID Radio Frequency Identification

RSSI Received Signal Strength Indication

SCK Serial Clock

SF Spreading Factor

SPI Serial Peripheral Interface

SNR Signal-to-noise ratio

TDOA Time Difference of Arrival

TOA Time of Arrival

TEB Taux D’erreur Bit

UHF Ultra High Frequency

Wi-Fi Wireless Fidelity

WLAN Wide local Area network

WN Wireless Network

Liste abréviations

WSN	Wireless Sensor Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

Introduction générale

Introduction générale

L'avènement des objets communicants et des réseaux de capteurs sans fil a ouvert la voie à de nombreuses applications novatrices dans divers domaines tels que l'Internet des objets (IoT), la logistique, la gestion de l'énergie et la surveillance environnementale. Cependant, le suivi et la localisation précise de ces objets communicants au sein de ces réseaux restent des défis importants à relever.

Les systèmes de localisation courants, tels que le GPS et le GSM, présentent des problèmes et des dépendances qui peuvent limiter leur efficacité dans certaines situations. Ces problèmes incluent la dépendance au GPS dans les environnements intérieurs et les zones urbaines denses, la dépendance au GSM dans les zones rurales ou éloignées avec une couverture limitée, la consommation énergétique élevée des systèmes basés sur le GPS et le GSM, la précision limitée qui peut entraîner des erreurs de localisation et enfin les problèmes de confidentialité et de sécurité associés à ces systèmes. Pour résoudre ces limitations, le projet "Étude et implémentation d'un système intelligent de localisation des objets communicants dans un réseau de capteurs sans fil" vise à développer des approches novatrices pour une localisation précise et fiable des objets communicants, indépendamment du GPS et du GSM.

Ces dernières années, de nouvelles techniques de localisation hybrides ont été développées pour améliorer la précision des systèmes de localisation en intérieur et en extérieur. Elles combinent plusieurs technologies telles que le Wi-Fi, le Bluetooth, les capteurs inertiels, la vision par ordinateur et les signaux GPS pour obtenir des estimations de localisation plus précises. Parmi ces techniques, on trouve la méthode de localisation basée sur le Received Signal Strength Indicator (RSSI), qui utilise la puissance du signal reçu pour estimer la distance par rapport aux points d'accès Wi-Fi ou aux balises Bluetooth. Une autre technique est la méthode de localisation basée sur l'Angle of Arrival (AoA) et le Time of Arrival (ToA), qui utilisent respectivement l'angle d'arrivée du signal et le temps écoulé entre l'émission et la réception pour trianguler la position du dispositif. Ces techniques hybrides exploitent les forces de chaque technologie pour améliorer la précision de la localisation, qu'elle soit en intérieur ou en extérieur, en fonction des technologies disponibles dans l'environnement.

Le mémoire est organisé en trois chapitres comme suit : Le premier chapitre explicite d’une part les réseaux de capteurs sans fil, l’architecture avec les caractéristiques, les applications et les différents des technologies de communication dans les réseaux de capteurs sans fil. D’autre part les réseaux LPWAN et la technologie LoRa.

Le second chapitre consiste à expliciter les différentes techniques de localisation dans les réseaux de capteurs sans fil. Une autre partie est dédiée à l'exposition de domaine d'intelligence artificielle pour la localisation et leurs applications : apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage renforcé. Pour cela, on a adopté le modèle des réseaux neurones artificiels (ANN) et ses domaines d'utilisation.

Le dernier chapitre, est consacré à la partie pratique, on présente le matériel utilisé pour la collecte des données, et l'élaboration d'un modèle ANN capable de détecter et localiser les positions des objets d'une façon automatique avec une grande précision en utilisant les RSSIs. Après on a fait la comparaison entre deux méthodes.

Chapitre I

Les réseaux de capteurs sans fil

I.1 Introduction

Ce chapitre intitulé « **Les réseaux de capteurs sans fil** », consiste à découvrir les différents aspects des réseaux de capteurs sans fil, en nous concentrant sur la technologie de communication dans ces réseaux, ainsi que sur les réseaux LPWAN et la technologie LoRa. Nous étudierons les principes fondamentaux, les caractéristiques clés et les avantages offerts par ces technologies, ainsi que leurs applications pratiques. En comprenant ces notions, nous serons en mesure d'appréhender l'importance croissante des réseaux de capteurs sans fil dans notre société connectée et les opportunités qu'ils offrent pour résoudre des problèmes complexes et améliorer notre qualité de vie.

I.2 Les réseaux de capteurs sans fil

I.2.1 Définition de RCSFs

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont des réseaux qui regroupent généralement de nombreux appareils équipés de capteurs. Ces capteurs mesurent des grandeurs physiques ou environnementales afin de surveiller différents phénomènes. Les appareils des RCSF sont autonomes et sont connectés de manière autoorganisée [1].

I.2.2 Architecture d'un nœud de capteur sans fil

Un nœud capteur est composé de quatre unités de base [2], représentées dans la figure I-1 et qui sont :

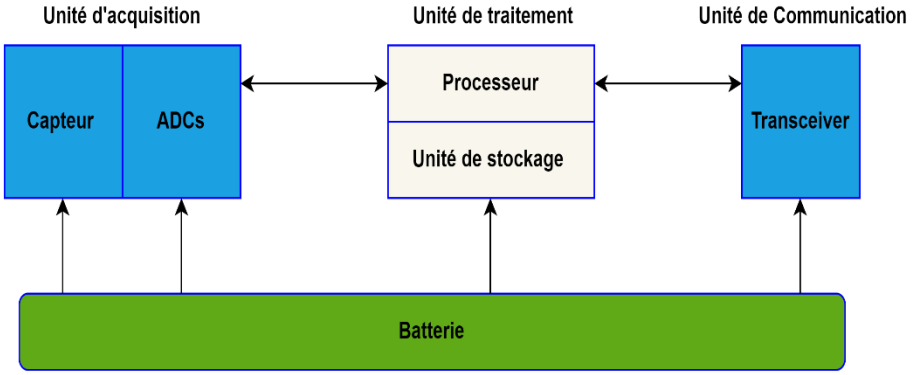


Figure I- 1 : Architecture d'un capteur sans fil

I.2.2.1 Unité d'acquisition

En général, elle se compose de deux parties distinctes : un capteur qui recueille des données sur les conditions environnementales et les convertit en signaux analogiques, et un convertisseur analogique-numérique (ADC) qui convertit ces signaux en signaux numériques.

L'unité de traitement utilise ensuite ces signaux numériques pour effectuer les calculs nécessaires [3].

I.2.2.2 Unité de traitement

Elle est généralement composée d'une petite unité de stockage pour stocker les données collectées, et d'un processeur pour traiter les données et contrôler les procédures permettant au nœud capteur de collaborer avec d'autres nœuds pour réaliser les tâches d'acquisition [3].

I.2.2.3 Unité de communication

L'unité a pour responsabilité d'assurer la communication entre les nœuds capteurs du réseau en utilisant un dispositif radio qui permet l'émission et la réception des données sans fil. Elle fonctionne sur le principe émetteur/récepteur pour garantir une transmission efficace des données entre les nœuds [4].

I.2.2.4 Unité d'alimentation

La batterie est un élément clé d'un nœud capteur car elle fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement des autres unités. Cependant, sa capacité énergétique est généralement limitée et elle n'est ni rechargeable ni remplaçable, ce qui entraîne une contrainte énergétique importante dans les réseaux capteurs sans fil [3].

I.2.3 Caractéristiques

RCSF est actuellement utilisé dans des environnements physiques non surveillés du monde réel pour mesurer de nombreux paramètres. Par conséquent, les caractéristiques de RCSF doivent être prises en compte pour un déploiement efficace du réseau. Les caractéristiques importantes de RCSF sont décrites comme suit :

I.2.3.1 Coût réduit

Dans les réseaux de capteurs sans fil, des centaines ou des milliers de nœuds capteurs sont généralement déployés pour mesurer l'environnement physique. Afin de réduire le coût global de l'ensemble du réseau, le coût du nœud capteur doit être maintenu aussi bas que possible [5].

I.2.3.2 Efficacité énergétique

L'énergie dans les RCSF est utilisée à différentes fins telles que le calcul, la communication et le stockage. Le nœud capteur consomme plus d'énergie pour la communication que pour toute autre chose. S'ils sont à court de puissance, ils deviennent souvent invalides car nous n'avons pas d'option pour les recharger. Par conséquent, les

protocoles et l'élaboration d'algorithmes doivent prendre en compte la consommation d'énergie lors de la phase de conception [5].

I.2.3.3 Puissance de calcul

Normalement, le nœud a des capacités de calcul limitées, car le coût et l'énergie doivent être pris en compte [5] La limitation de la puissance de calcul des nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) constitue une contrainte majeure pour leur conception et leur fonctionnement. Les nœuds doivent ainsi être conçus pour effectuer des tâches simples tout en optimisant l'utilisation des ressources limitées dont ils disposent. En effet, cette limitation se reflète dans plusieurs aspects du fonctionnement des RCSF, tels que le traitement des données, la communication et la sécurité.

I.2.3.4 Capacités de communication

Les RCSF communiquent généralement à l'aide d'ondes radio sur un canal sans fil. Ils ont la propriété de communiquer sur une courte portée, avec une bande passante étroite et dynamique. Le canal de communication peut être bidirectionnel ou unidirectionnel. Avec l'environnement opérationnel non surveillé et hostile, Par conséquent, le matériel et le logiciel de communication doivent tenir compte de la robustesse, de la sécurité et de la résilience.

I.2.3.5 Sécurité et confidentialité

Chaque nœud capteur doit disposer de mécanismes de sécurité suffisants pour empêcher l'accès non autorisé, les attaques et les dommages involontaires des informations à l'intérieur du nœud capteur. De plus, des mécanismes de confidentialité supplémentaires doivent également être inclus [5].

I.2.3.6 Détection et traitement distribués

Un grand nombre de nœuds capteurs sont distribués uniformément ou aléatoirement. Dans les RCSF, chaque nœud est capable de collecter, trier, traiter, agréger et envoyer les données vers le collecteur. Par conséquent, la détection distribuée offre la robustesse du système [5].

I.2.3.7 La tolérance aux pannes

Dans le cas de dysfonctionnement d'un nœud (manque d'énergie, interférences avec l'environnement d'observation…) ou aussi en cas d'ajout de nouveaux nœuds capteurs dans le réseau, ce nœud doit continuer à fonctionner normalement sans interruption [6]. Ceci explique le fait qu'un RCSF n'adopte pas de topologie fixe mais plutôt dynamique.

I.2.3.8 La topologie du réseau dynamique

En général les RCSFs sont dynamiques. Les nœuds capteurs peuvent tomber en panne en raison de l'épuisement de la batterie ou d'autres circonstances, le canal de communication peut être perturbé, et des nœuds de capteurs supplémentaires peuvent être ajoutés au réseau, ce qui résulte en des changements fréquents de la topologie du réseau. Ainsi, les nœuds du RCSF doivent être équipés de fonctions de reconfiguration et d'auto-ajustement [7].

I.2.3.9 Auto-organisation

Cherche à structurer la topologie du réseau en tirant partie des propriétés des nœuds tels que l'énergie résiduelle, la densité, etc. Par exemple, est-il préférable de proposer une architecture à plat du réseau ou au contraire est-il nécessaire de proposer des mécanismes regroupant les nœuds suivant des critères comme les services, les interfaces radio, les capacités, l'énergie disponible, etc. L'auto organisation doit également répondre à la prise en compte efficace de la dynamicité du réseau [8].

I.2.3.10 Communication multi-sauts

Les nœuds de capteurs dans RCSF sont équipés d'émetteurs-récepteurs dotés d'antennes omnidirectionnelles, qui établissent une communication en mode sans fil avec les nœuds voisins sur un support de radiofréquence (RF). Contraints par des contraintes d'énergie, de taille et d'espace, les capteurs sans fil fonctionnent sur des antennes RF miniatures. L'énergie dépensée par les nœuds pour la transmission RF est relativement importante par rapport à des opérations telles que le traitement de données, le calcul et la génération de signaux de commande. De plus, plus un nœud transmet loin pour atteindre son voisin, plus l'énergie qu'il consomme est importante. Par conséquent, afin d'optimiser l'énergie de la batterie, les émetteurs-récepteurs RF ont recours à des transmissions à courte portée avec leurs nœuds voisins immédiats à un saut. Pour faciliter la communication entre la BS et les nœuds qui ne sont pas à une distance d'un saut, un routage multi-sauts est établi [9].

I.2.3.11 Petite taille physique

Les nœuds capteurs sont généralement de petite taille et ont une portée limitée en raison de leur taille, leur énergie est limitée, ce qui rend leur capacité de communication faible [10].

I.2.4 Application

La miniaturisation, l'adaptabilité, le faible coût et la communication sans fil permettent de capteurs de s'installer dans plusieurs domaines d'application et permettent aussi d´étendre le domaine des applications existantes. Parmi ces domaines où ces réseaux se révèlent très utiles

et peuvent offrir de meilleures contributions, on peut noter les domaines militaires, de la santé, de l'environnement.

I.3 Technologie de communication dans les réseaux de capteurs sans fil

I.3.1 Technologie Wifi

I.3.1.1 Définition

Le Wi-Fi est un protocole de réseau sans fil que les appareils utilisent pour communiquer sans connexion directe par câble [11]. C'est un terme de l'industrie qui représente un type de protocole de réseau local sans fil (WLAN) basé sur la norme de réseau 802.11 IEEE. Du point de vue de l'utilisateur, le Wi-Fi permet l'accès internet à partir d'un appareil compatible sans fil comme un téléphone, une tablette ou un ordinateur portable. La plupart des appareils modernes prennent en charge le Wi-Fi afin que les appareils puissent rejoindre un réseau pour accéder à internet et partager les ressources du réseau.

I.3.1.2 Les normes de Wifi

Le Wi-Fi est le moyen le plus fréquemment utilisé pour communiquer des données sans fil dans un lieu fixe [12] :

Tableau I-0-1 : les normes de la technologie Wifi

Norme Wifi	Date d'apparition	Fréquences	Largeur de canal	Débit maximum théorique	Portée	Nom
802.11	1997	2,4Ghz	20Mhz	2Mbps	20m	Wi-Fi
802.11b	1999	2,4Ghz	20Mhz	11Mbps	35m	Wi-Fi 1
802.11a	1999	5Ghz	20Mhz	54Mbps	35m	Wi-Fi 2
802.11g	2003	2,4Ghz	20Mhz	54Mbps	38m	Wi-Fi 3
802.11n	2009	2,4Ghz ou 5Ghz	20,40Mhz	72,2-450Mbps	70m	Wi-Fi 4
802.11ac Vague 1	2014	5Ghz	20,40,80Mhz	866,7Mbps	35m	Wi-Fi 5
802.11ac Vague 2	2016	5Ghz	20,40,80, 160Mhz	1,73Gbps	35m	Wi-Fi 5
802.11ax	Fin 2019	2,4Ghz ou 5Ghz	20,40,80, 160Mhz	2,4Gbps	35m	Wi-Fi 6

I.3.1.3 Les avantages de wifi [13]

- Le Wi-Fi permet de déployer des LANs sans câblage pour les appareils du client, réduisant généralement les coûts de réseau déploiement et extension. Les espaces où les câbles ne peuvent pas être acheminés, comme espaces extérieurs et bâtiments historiques, peut héberger des LAN sans fil.
- En raison de l'installation confortable et rapide, les gens remplacent souvent les LAN câblés audacieux par le Wi-Fi.
- La connexion permet de déplacer votre machine sans perdre l'accès à Internet ou à d'autres ressources réseau.

I.3.2 Technologie Bluetooth

I.3.2.1 Définition

Le Bluetooth aussi connue sous le nom IEEE 802.15.1 définit un standard de communication développé en 1994 par le fabricant suédois Ericsson. Cette technologie, basée sur l'utilisation d'ondes radio UHF, permet une connexion entre plusieurs périphériques et l'échange bidirectionnel de données et de fichiers sur une très courte distance. Il fonctionne sur les fréquences comprises entre 2.4 GHz et 2.483 GHz [14].

I.3.2.2 Portée

La portée d'une liaison RF à 2,45 GHz dépend : de la puissance d'émission ; de la qualité de l'antenne (forcément limitée par les dimensions des systèmes hôtes) et de l'environnement (obstacles, interférences...). La puissance d'émission permise pour un équipement Bluetooth est réglementée. Trois classes de puissance sont définies par la norme mais seules les classes 1 et 3 sont couramment utilisées.

Tableau I-0-2 : la portée de la technologie Bluetooth

Classe	Puissance d'émission maximale	Portée en champ libre
1	100 mw	100 m
2	2,5 mW	40 m
3	1 mW	10 m

I.3.2.3 Les avantages [15] [16]

- Le principal objectif du Bluetooth est bien évidemment une utilisation sans fil, augmentant de manière générale l'ergonomie et l'utilisation des appareils connectés.
- Pas de contact visuel obligatoire entre les appareils : grand avantage d'utiliser les ondes radio, les appareils ne sont pas obligatoirement en contact visuel, contrairement à la technologie infrarouge.

I.3.2.4 Les inconvénients [16]

- Les collisions sur le canal hertzien : la technologie Bluetooth utilise la même fréquence que les ondes radio et que le WIFI (2.4 GHz). Les possibilités de collisions sont donc assez importantes même avec un four à micro-onde par exemple.
- Le Bluetooth est moins puissant que le WIFI et sa portée est donc moindre. Elle peut aller jusque 100m mais cette distance diminue suivant le nombre d'obstacles rencontrés.

I.3.3 Technologie Zigbee

I.3.3.1 Définition

La technologie ZigBee (aussi connue sous le nom IEEE 802.15.4) permet d'obtenir des liaisons sans fil à très bas prix et avec une très faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée pour être directement intégrée dans de petits appareils électroniques (appareils électroménagers, hifi, jouets, ...). La technologie ZigBee, opérant sur la bande de fréquences des 2,4 GHz et sur 16 canaux, permet d'obtenir des débits pouvant atteindre 250 Kb/s avec une portée maximale de 100 mètres environ [17].

I.3.3.2 Types de périphériques logiques ZigBee [18]

Il existe trois catégories de nœuds dans un système ZigBee sont des périphériques Coordinateur, Router et End devise.

1) Coordinateur : Forme la racine de l'arborescence du réseau et peut être relié à d'autres réseaux. Il y en a exactement un coordinateur dans chaque réseau. Il est responsable de la mise en œuvre le réseau et la sélection des paramètres de réseau tels que canal de radiofréquence, identifiant unique de réseau et définition d'autres paramètres opérationnels. Il peut également stocker les informations sur le réseau, clés de sécurité.

2) Routeur : le routeur agit comme des nœuds intermédiaires, relayant données provenant d'autres périphériques. Le routeur peut se connecter à un réseau existant, également capable d'accepter les connexions d'autres et être une sorte de retransmetteur vers le réseau. Le réseau peut être étendu par l'utilisation de routeurs ZigBee. Réseau ZigBee

3) Périphériques d'extrémité : peut-être de faible puissance / dispositifs alimentés par batterie. Ils peuvent recueillir diverses informations provenant des capteurs et des commutateurs. Ceci des fonctionnalités réduites permettent de réduire les coûts. Ils prennent en charge de meilleure modèle basse consommation. Ces appareils ne pas avoir à rester éveillé tout le temps, pendant que les appareils appartenant aux deux autres catégories doivent le faire. Chaque extrémité le périphérique peut avoir jusqu'à 240 nœuds d'extrémité séparés applications partageant la même radio.

I.3.3.3 Les avantages [19]

- Fournit la capacité de réponse à la demande et de charge Contrôle
- Fournit un mécanisme de tarification selon l'heure d'utilisation et niveaux de prix
- Fournit une connexion de messagerie fiable entre propriétaires de maison et entreprises de services publics
- Fournit des informations d'utilisation en temps réel
- Permet la communication compteur à compteur pour les sous-marins mesure
- Fournit une surveillance et un contrôle à distance de l'ensemble état de la maison

I.3.3.4 Les inconvénients [20]

- Il n'est pas sécurisé comme le système sécurisé basé sur le wifi.
- Le coût de remplacement sera élevé en cas de problème dans les appareils électroménagers compatibles zigbee. Comme d'autres systèmes sans fil, la communication basée sur le zigbee est sujette aux attaques de personnes non autorisées.
- La couverture est limitée et ne peut donc pas être utilisée comme système de communication sans fil extérieur. Il peut être utilisé dans des applications sans fil intérieures.

I.4 Les réseaux LPWAN

I.4.1 Définition

Le réseau étendu à faible puissance (LPWAN) est considéré comme l'un des catalyseurs de l'Internet des objets (IoT), où des milliards d'appareils seront connectés. En plus des systèmes sans fil à courte portée existants tels que Bluetooth, Zig-Bee, WIFI, etc., les réseaux LPWAN

offrent une couverture étendue pour de nombreuses applications IoT nécessitant peu de puissance [21]. En conséquence, en raison de son fonctionnement à faible coût par rapport aux systèmes de réseau mobile traditionnels et de sa meilleure efficacité énergétique, il peut être considéré comme la future solution de l'IoT industriel.

I.4.2 Comparaison avec les autres types de réseaux

Dans la Figure **I-5**, une comparaison est montrée entre les technologies sans fil à courte portée et à longue portée en ce qui concerne les débits de transmission.

Comme indiqué ci-dessus, le LPWAN peut être réalisé en mettant en œuvre des technologies telles que Sigfox, Lora, NB-IoT et CAT-M1. Toutes ces technologies, licenciées ou non, propriétaires ou non, sont présentées dans [22] et peuvent constituer une solution différente pour la grande majorité des industries de l'IoT.

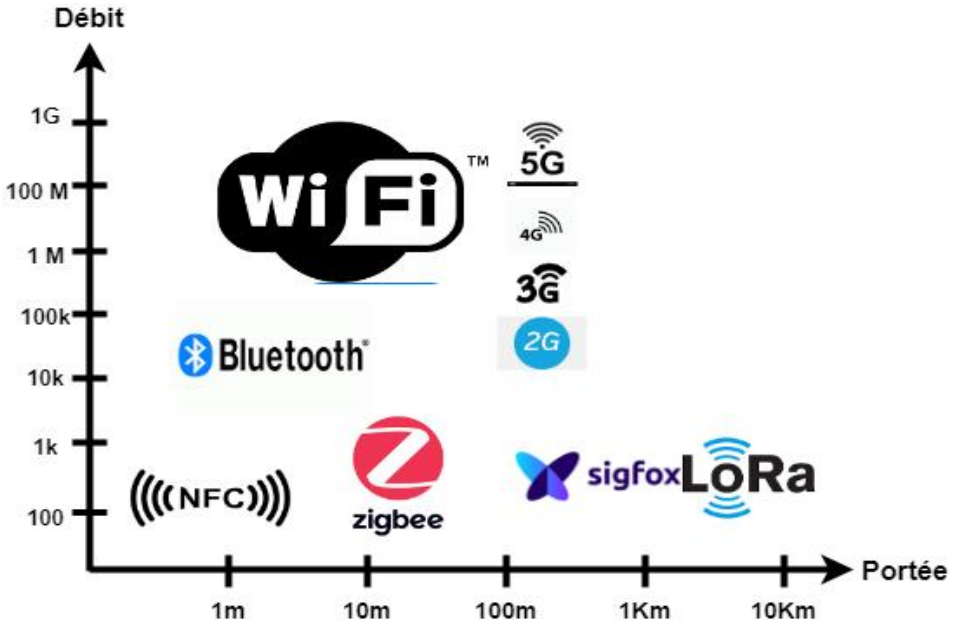


Figure I- 2 : Comparaison entre les réseaux de communications sans fil [23]

Bien que les technologies de connectivité IoT telles que Bluetooth, Zigbee et Wi-Fi soient adaptées pour les applications grandes publiques, de nombreuses applications IoT, notamment dans les déploiements industriels, civiques et commerciaux, nécessitent un réseau LPWAN rentable pour prendre en charge un grand nombre d'appareils à faible consommation d'énergie sur une grande zone. Contrairement aux technologies sans fil précédentes, le LPWAN offre une connectivité étendue et peu énergivore, ce qui permet de prendre en charge davantage d'applications M2M (Machine to Machine) et IoT qui étaient auparavant coûteuses. Toutefois, la quantité de données qui peut être transmise est limitée, mais cela n'est pas un problème

majeur pour la plupart des applications IoT qui nécessitent moins de 3 Mo de données par mois [24].

Les réseaux cellulaires souffrent souvent d'une faible autonomie de batterie et d'une couverture insuffisante, tandis que les technologies de radiofréquence (RF) comme Bluetooth et NFC (Near Field Communication) n'ont pas la portée nécessaire pour de nombreuses applications IoT. Les technologies de maillage, telles que Zigbee, sont mieux adaptées pour les applications IoT à moyenne distance comme les maisons intelligentes ou les bâtiments intelligents, mais elles sont moins économes en énergie que le LPWAN [24].

I.5 La technologie LoRa

I.5.1 Définition

LoRa (Long Range) est un spectre étalé propriétaire technique de modulation par Semtech. C'est un dérivé de Chirp Spectre étalé (CSS). La couche physique LoRa peut être utilisée avec n'importe quelle couche MAC ; cependant, LoRaWAN est le MAC actuellement proposé qui opère un réseau en une topologie en étoile [25].

I.5.2 Historique

Cette technologie a été créée par des ingénieurs français de la start-up grenobloise Cycleo. L'entreprise, fondée en 2009, a été rachetée en 2012 pour 21 millions de dollars par le spécialiste américain des semi-conducteurs Semtech [26].

I.5.3 Modulation LoRa (couche physique)

La modulation LoRa (Long Range) est une technique de modulation utilisée pour les communications sans fil à longue portée et à faible consommation d'énergie. Elle utilise une technique de modulation à spectre étalé appelée "chirp spread spectrum" (CSS) pour permettre une communication à longue portée à faible niveau de puissance, ce qui en fait une technologie idéale pour les dispositifs de l'Internet des objets (IoT)[27].

I.5.4 Le Chirp [27]

Le signal émis par la modulation LoRa est un symbole dont la forme de base est représentée ci-dessous. Son nom (Chirp) vient du fait que ce symbole est utilisé dans la technologie Radar (Chirp Compressed High Intensity Radar Pulse).

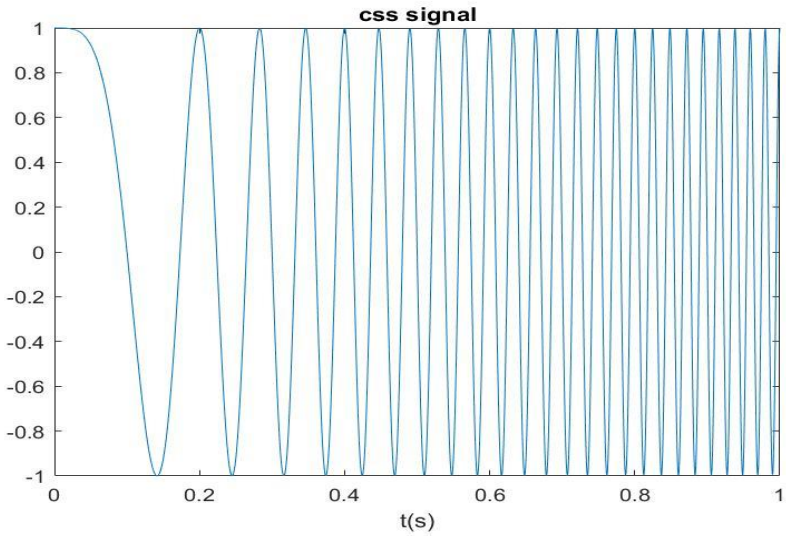


Figure I- 3 : Signal Chirp généré sur Matlab (A = 1, F0 = 25 Hz, ΔF = 50 Hz)

La fonction qui ploter le signal chirp :

$$W_t = 2\pi \times (F_0 + \left(\frac{\Delta F}{2T}\right) \times t - \left(\frac{\Delta F}{2}\right)) \times t) \quad \text{(I-1)}$$

$$Y = A \times \cos(w_t) \quad \text{(I-2)}$$

La fréquence de départ est la fréquence centrale du canal moins la Bande Passante divisée par deux.

- ✓ La fréquence finale est la fréquence centrale du canal plus la Bande Passante divisée par deux. La Figure I-7 représente un Chirp LoRa dans le domaine fréquentiel.
- ✓ Le canal (F centrale) est la fréquence centrale.
- ✓ La bande occupée autour de F (centrale) est la bande passante (BW).

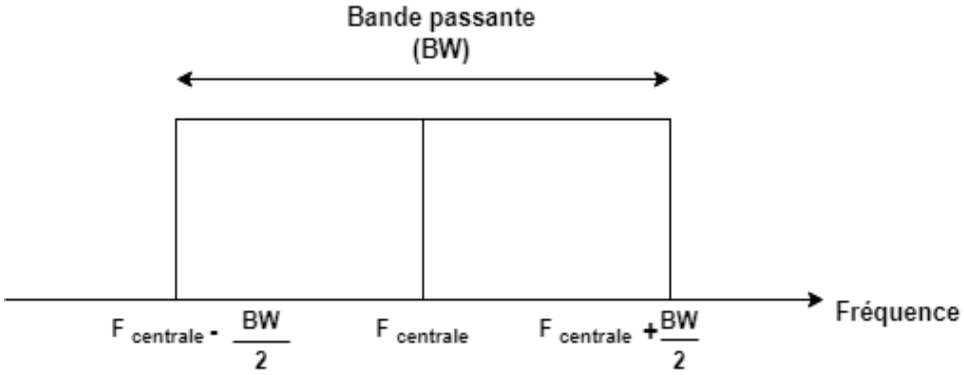


Figure I- 4 : Bande passante pour la transmission LoRa [27]

I.5.5 Durée d'émission d'un symbole

En LoRa, le temps d'émission de chaque symbole (Tsymbole) dépend du Spreading Factor utilisé. Plus le SF est élevé, plus le temps d'émission sera long. Pour une même bande passante, le temps de transmission d'un symbole en SF8 est deux fois plus long que le temps de transmission d'un symbole en SF7. Ainsi de suite jusqu'à SF12 [27] :

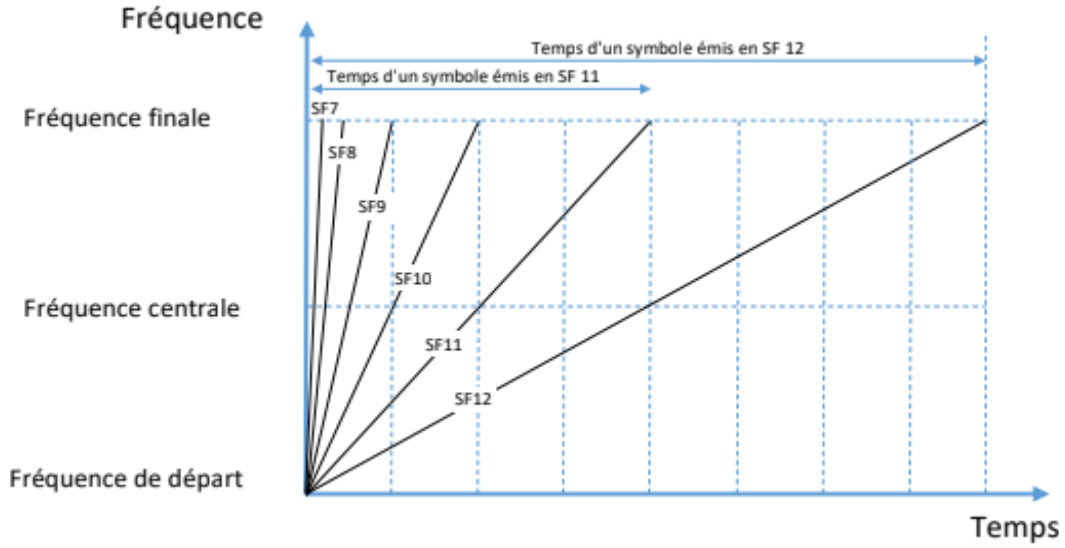


Figure I- 5 : Temps d'émission d'un symbole [27]

Lorsqu'on parle de la durée d'émission de chaque symbole (Tsymbole) qui est inversement proportionnelle à la bande passante, $\mathbf{Ts} = \frac{2^{SF}}{Bandwidth}$. Le débit des symboles est donc de $\frac{1}{Ts} = Fs = \frac{Bandwidth}{2^{SF}}$. En toute logique, plus la bande passant est élevé, plus le débit des symboles seront élevé. Comme chaque symbole comprend SF bit, on retrouve alors le débit binaire [27] :

$$\text{Bit Rate} = SF.\frac{Bandwidth}{2^{SF}} \quad \text{(I-3)}$$

I.5.6 Le facteur d'étalement (spreading factor)

Le facteur d'étalement noté SF (Spreading factor) est une grandeur définie par le rapport entre débits de chip et le débit de symbole. Un chip représente des impulsions d'un code à spectre étalé et un symbole représente plusieurs chips.

Un chirp contient 2SF bits par symbole. Dans un Modèle de déploiement optimal des nœuds pour un réseau LoRa multilinéaire de bout en bout sans fil ASS DIANE 33 réseau LoRaWAN le facteur d'étalement est un entier compris entre 7 et 12 [28].

Ce paramètre permet de varier la portée et le débit de transmission et d'envoyer simultanément sur un canal donné. Un facteur d'étalement élevé implique une longue portée de transmission est un débit faible [29] (voir Tableau I.3).

Tableau I-3 : LoRa Spreading Factors [38]

Spreading factor (for UL at 125KHz)	Bit rate	Range (Dépends on Terrain)	Time on Air (for an11-bytes playload)
SF7	5470 bps	2 km	56 ms
SF8	3125 bps	4 km	100 ms
SF9	1760 bps	6 km	200 ms
SF10	980 bps	8 km	370 ms
SF11	537 bps	11 km	740 ms
SF12	293 bps	14 km	1400 ms

I.5.7 Taux de codage (Coding rate)

LoRa utilise la technique FEC (Forward error correction) pour la détection et la correction d'erreurs dans les trames transmises. Des bits supplémentaires sont ajoutés à la trame, principalement au niveau de la charge utile. Dans LoRa, ces bits supplémentaires sont contrôlés par le taux de codage (CR). Les valeurs que peut prendre le taux de codage sont 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8 [28].

Le choix du taux de codage a un impact direct sur la performance du système. Une valeur élevée du taux de codage augmente le temps d'antenne des nœuds, ce qui peut entraîner une consommation énergétique plus importante. En revanche, une valeur plus faible peut augmenter la portée de transmission, mais au détriment du débit de données et de la résistance aux interférences et au bruit.

Ainsi, pour optimiser la performance du système, il est nécessaire de trouver un compromis entre ces différents paramètres en fonction des besoins spécifiques de l'application. Par exemple, pour une application nécessitant une grande portée de transmission, un taux de codage plus faible peut être préférable, tandis que pour une application nécessitant une grande fiabilité des données, un taux de codage plus élevé peut être plus approprié [28].

I.5.8 Le Time on Air

Le temps d´émission d'une trame sur le m´médium en fonction des différents paramètres est très important pour estimer un d´débit utile et des profils applicatifs de la technologie. Ce temps est quasi proportionnel au nombre d'octets utiles mais attention le coefficient multiplicateur varie énormément d'un paramétrage à l'autre [30].

Le "Time on Air" est la durée globale d'une trame LoRa. Il dépend du nombre de symboles présents dans la trame en prenant en compte le préambule, l'entête, le payload et le CRC [27].

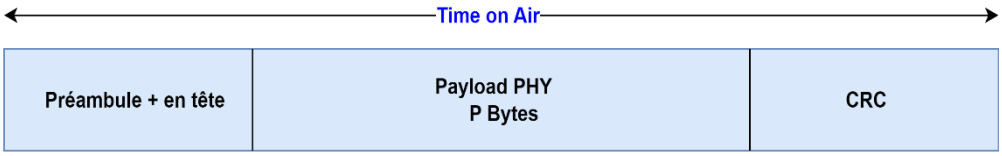


Figure I- 6 : Time on Air d'une trame LoRa

Time on Air =$n_{symbole}$. $T_{symbole}$ Où $n_{symbole}$ est le nombre de symboles présents dans la trame LoRa.

Nous verrons plus tard dans le cours une façon de calculer $n_{symbole}$afin de trouver le Time on Air d'une transmission LoRa.

I.5.9 Débit binaire en LoRa

Comme chaque symbole est composé de SF bits, le débit binaire est de (I-3) :

Un symbole s (nT_s) est envoyé à l'entrée du modulateur toutes les Ts = 2SF · T. Le symbole s (nTs) est un nombre réel formé à l'aide d'un vecteur w (nTs) de chiffres binaires SF, avec SF un paramètre entier appelé, dans le contexte de LoRa, facteur d'étalement (usuellement en prenant des valeurs dans {7, 8, 9, 10, 11, 12}) c'est-à-dire [31],

$$\boldsymbol{s\,(nT_s) = \sum_{h=0}^{ST-1} W(nT_s)_h \cdot 2^h} \qquad \text{(I-4)}$$

Nous pouvons voir que *s* (nT_s) prend des valeurs dans {0, 1, 2, 2SF - 1}. La forme d'onde transmise, de durée T_s, pendant un certain temps s (nT_s) est alors [31]

$$\mathbf{c}(nT_s + \mathbf{kT}) = \frac{1}{\sqrt{2SF}}\, \mathbf{e}^{\mathbf{j2\pi}[(\mathbf{s(nT_s)+k})_{\mathbf{mod}\ 2^{SF}}]\mathbf{kT}\frac{\mathbf{B}}{\mathbf{2^{SF}}}} \qquad \text{(I-5)}$$

I.5.10 Les différents types de modules LoRa

I.5.10.1 Module LoRa (RFM95W)

Les émetteurs-récepteurs RFM95W sont équipés du modem LoRa (TM), qui permet une communication à spectre étalé ultra-longue portée tout en minimisant la consommation d'énergie et en offrant une grande immunité aux interférences.

La technique de modulation brevetée LoRa (TM) de Hope RF permet au RFM95W d'atteindre une sensibilité de plus de -148 dBm en utilisant des composants courants et un quartz peu coûteux. Grâce à la grande sensibilité et à l'amplificateur de puissance intégré de +20 dBm, le RFM95W offre un budget de liaison de premier ordre dans l'industrie, ce qui le rend idéal pour les applications nécessitant une portée ou une robustesse élevée. De plus, la modulation LoRa(TM) offre des avantages significatifs en termes de blocage et de sélectivité par rapport aux techniques de modulation classiques, ce qui résout le compromis traditionnel entre portée, immunité aux interférences et consommation d'énergie.

I.5.10.2 Module LoRa (RN2903)

Le module RN2903 est entièrement certifié et fonctionne sur la fréquence de 915 MHz en utilisant la technologie sans fil LoRa®. Il est équipé d'une modulation à spectre étalé unique dans la bande Sub-GHz qui lui permet d'avoir une grande portée, une consommation d'énergie réduite et une capacité réseau élevée.

I.5.10.3 Module LoRa (SX1278)

Le module LoRa (SX1278) permet des transmissions de données à longue portée avec une faible consommation d'énergie grâce à la technologie LoRa (Long Range). Avec une interface SPI et sa petite taille, il est facilement intégrable dans des projets électroniques. Il est adapté pour une variété d'applications nécessitant une communication longue distance, comme les systèmes de télémétrie, de surveillance à distance ou les capteurs sans fil.

Le module LoRa (SX1278) possède les caractéristiques suivantes :

- Utilisation de la technologie de modulation LoRa pour permettre des transmissions à longue portée
- Fréquence de fonctionnement allant de 137 MHz à 525 MHz
- Sensibilité de réception élevée de -148 dBm et Puissance de sortie de 20 dBm
- Consommation de courant en veille faible (moins de 1 µA)
- Interface SPI pour une intégration facile avec des microcontrôleurs
- Support de différents modes de modulation (FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa et OOK)

- Possibilité de sélectionner une bande passante de 7,8 kHz à 500 kHz pour la transmission de données
- Protection intégrée contre les surtensions et les surintensités
- Format compact pour une intégration facile dans des projets de petite taille

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les réseaux de capteurs sans fil avec des figures et des schémas explicatifs, nous avons présenté les différentes caractéristiques dès les réseaux de capteurs sans fil et les applications avec leurs exemples, Cette étude va nous permettre de définir les réseaux LPWAN, ensuite décrit sur la technologie LoRa et leur modulation.

Chapitre 2
Généralités sur la localisation et les réseaux de neurone

II.1 Introduction

Ce chapitre intitulé « **Généralités sur la localisation et les réseaux de neurone** », consiste à découvrir les différentes méthodes de localisation et le domaine d'intelligence artificielle et ses domaines applications. D'autre part, on a défini : les réseaux neurones en générales (réseaux neurones artificiels) tout en détaillant les différents paramètres de chaque couche dans l'architecture des réseaux de neurones.

Enfin on veut faire une description d'utilisation des réseaux de neurones pour la régression.

II.2 Techniques de localisation dans les réseaux de capteurs sans fil

II.2.1 Localisations par temps d'arrivée (TOA)

Le temps d'arrivée "Time of Arrival" (TOA) est défini comme le moment où un signal reçu est détecté pour la première fois par un récepteur. Pour mesurer le TOA, le temps résultant de la propagation doit être calculé en plus du temps de transmission lui-même. Ce délai de propagation, lorsqu'il est divisé par la vitesse du signal transmis, est ensuite traduit en une distance de séparation entre une paire émetteur-récepteur (Tx-Rx) [32].

La mesure du temps d'arrivée ToA se base sur la théorie des propagations des signaux ainsi que la notion de synchronisation entre un émetteur et un récepteur. En effet, par définition, la distance D entre un émetteur et un récepteur est donnée par :

$$\mathrm{D} = \mathrm{Temps} \times \mathrm{Vitesse} \qquad \text{(II-1)}$$

Notons que la vitesse de propagation d'un signal radio dépend du milieu en question. Dans l'air, et dans un environnement sans obstacles, la vitesse de propagation d'un signal radio ≈ célérité de la lumière = 3×10^{8}m/s.

Cependant, cette mesure suppose que l'émetteur et le récepteur sont parfaitement synchrones. Dans le cas où cette synchronisation est difficile, voire, impossible à réaliser, il est plus pratique d'appliquer la mesure qui exploite la différence des retards entre les temps d'arrivée des signaux au niveau du récepteur (TDoA) [33].

II.2.1.1 Les Avantages [34]

- Donne une grande précision pour la localisation.
- Peut-être adapter à un multiple d'applications.

II.2.1.2 Les inconvénients [34]

- Nécessite une forte synchronisation des nœuds ainsi qu'une horloge interne stable et précise.
- Nécessite un nombre important des nœuds références pour la solution de problème de synchronisation.
- Le problème de coût en équipements et en énergie.
- La précision dépend de la bande passante RF utilisée.

II.2.2 Localisations par l'angle d'arrivée (AOA)

Un système de localisation basé sur les angles d'incidence ou d'arrivée mesure l'angle entre la direction de propagation du rayonnement électromagnétique incident et la normale au réseau d'antennes du récepteur. Dans le cas d'un réseau d'antennes linéaire et uniforme, l'information sur l'angle d'arrivée (AoA) est obtenue en mesurant la différence de temps d'arrivée (TDoA) des signaux reçus par les éléments du réseau. Lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur est suffisamment grande, les fronts d'onde arrivant sur l'antenne peuvent être considérés comme planaires.

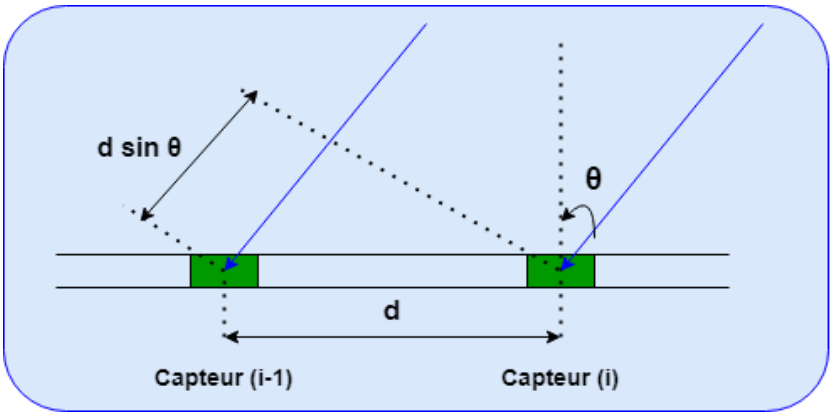


Figure II- 1 : Mesure de l'AoA par un réseau de capteurs

Cette propriété permet de calculer la TDoA ($\Delta\boldsymbol{\tau}$) en utilisant la relation suivante :

$$\Delta\boldsymbol{\tau} = \frac{\mathbf{d}\sin\theta}{\mathbf{c}} \qquad \text{(II-2)}$$

Où d est la distance entre deux éléments consécutifs du réseau, θ est l'angle d'incidence du signal reçu et c représente la vitesse de la lumière. L'angle d'arrivée (AoA) est utilisé dans des systèmes tels que les radars, les réseaux GSM et la navigation aérienne pour déterminer la direction**.**

II.2.2.1 Les Avantages [34]

- Ne nécessite que deux nœuds ancres pour la localisation.

II.2.2.2 Les inconvénients [34]

- Nécessite l'utilisation de réseaux d'antennes intelligentes.
- Consommation d'énergie due à la présence de plusieurs antennes.
- La précision dépend l'encombrement de la bande passante RF.

II.2.3 Localisations par la différence du temps d'arrivée (TDoA)

La différence de temps d'arrivée (TDoA) est une technique qui utilise la différence entre les moments de réception de plusieurs signaux distincts pour estimer la distance entre les nœuds. Cette méthode permet de mesurer la distance entre l'émetteur et le récepteur en prenant en compte les différentes vitesses de propagation des signaux sur différents supports de communication. En calculant la différence de temps d'arrivée entre les signaux, il est possible d'estimer la distance entre les nœuds et ainsi de déterminer leur position relative [35].

II.2.3.1 Les Avantages [34]

- Donne une grande précision pour la localisation.
- Peut-être utiliser dans plusieurs domaines d'applications.

II.2.3.2 Les inconvénients [34]

- Nécessite d'une forte synchronisation des nœuds.
- La précision dépend de la bande passante RF.
- Blocage de la bande passante pourrait causer de grandes erreurs.

II.2.4 Localisation par RSSI

C'est un indicateur de la puissance de signal au moment de la réception d'un message.[36] La technique de localisation basée sur le RSSI utilise la puissance du signal reçu pour estimer la distance entre un nœud émetteur et un nœud récepteur. La distance est estimée en utilisant un modèle de l'atténuation des ondes radio. Plusieurs modèles d'équations existent, l'équation de la transmission de Friis exprime le rapport entre la puissance reçue $\mathbf{P_r}$ et la puissance de transmission $\mathbf{P_t}$:

$$\frac{\mathbf{P_r}}{\mathbf{p_t}} = \mathbf{G_t} \times \mathbf{G_r} \times \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{L}} \times \frac{\boldsymbol{\lambda^2}}{\mathbf{(4\pi)^2 R^2}} \qquad \text{(II-3)}$$

Où $\mathbf{G_t}$ le gain d'antenne d'émission et $\mathbf{G_r}$ est le gain d'antenne de réception. En pratique, l'atténuation réelle dépend de propagation par trajets multiples effets, des réflexions, bruit, etc.

Le milieu traversé est caractérisé par les pertes **L**, R la distance entre l'E/R. Ces pertes sont liées à la fréquence du signal dont la longueur d'onde λ intervient dans la formule. Ce modèle fait donc l'hypothèse d'une répartition uniforme de l'énergie sur des sphères concentriques [37]. Il existe un autre modèle d'équation modèle de Shadowing, ce modèle comporte deux parties :

II.2.4.1 Le modèle d'atténuation :

Une distance de référence $\mathbf{d_0}$ est définie et un niveau de puissance reçue lui est associé. La puissance reçue à une distance **d** quelconque est liée à ces informations par la relation

$$\frac{\mathbf{P_r(d_0)}}{\mathbf{P_r(d)}} = \left(\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d_0}}\right)^{\beta} \quad \text{(II-4)}$$

II.2.4.2 La variation de la puissance à une distance donnée :

En un point donné, la puissance reçue varie au cours du temps. Une loi log-normale $\mathbf{X_{db}}$ a été retenue pour représenter cette variation. Le modèle complet s'écrit alors suivant l'équation *(II-5)* où **β** est un coefficient d'atténuation empirique.

$$\left(\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)}\right)_{db} = -10log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{db} \quad \textbf{(II-5)}$$

Si l'écriture du Shadowing model est plus complexe que celle des modèles précités, ses résultats sont plus proches de la réalité car la zone de portée n'est pas assimilée à un cercle mais à une surface dont les bornes varient au cours du temps, sans déplacement [37] de la source.

II.2.4.3 Les Avantages [34]

- Simple à mettre en œuvre, la plupart des nœuds possède l'information sur RSSI.
- Non sensible à la synchronisation.
- Faible coût car tous les nœuds sont déjà équipés de dispositif de communication sans fil.

II.2.4.4 Les inconvénients [34]

- Manque de la précision.
- Nécessite des modèles spécifiques pour le cas de l'application et de l'environnement.
- Très sensibles aux bruits de l'environnement.

Le tableau suivant montre une comparaison entre les méthodes d'estimations de distances :

Tableau II- 1 : Comparaison entre les méthodes d'estimation de distance

Méthode	Précision	Distance Maximale	Matériel supplémentaire	Défis (challenges)
RSSI	2-4 m	Dépend utilisation	Rien	Variations du RSSI, Interférences
TOA	2-3 cm	Dépend utilisation	Rien	Synchronisation des nœuds
TDOA	2-3 cm	Quelques mètres (2-10 m)	Capteur à ultrason	La distance maximale
AOA	Quelques degrés (5°)	Dépend utilisation	Un ensemble de récepteurs	Travailler avec des nœuds de petite taille

II.2.5 Localisation hybride

La localisation hybride est une méthode qui combine différentes techniques de mesure, telles que la mesure de la force du signal reçu (RSSI), l'angle d'arrivée (AOA), le temps d'arrivée (TOA) et la différence de temps d'arrivée (TDOA), pour obtenir une estimation plus précise de la position d'un objet ou d'une personne. En utilisant à la fois des signaux sans fil et des capteurs, cette méthode permet de compenser les limitations propres à chaque technique et d'améliorer la précision de la localisation. Les algorithmes utilisés pour combiner ces mesures dépendent des exigences spécifiques de l'application et de la précision requise [38] [39].

II.2.6 Dérivation des positions

La dérivation des positions consiste à calculer les positions finales de chaque nœud capteur en utilisant un des algorithmes de localisation. Chaque algorithme utilise une méthode de calcul qui dépend de la technique d'estimation de distance utilisée.

II.2.6.1 La trilatération

Cette méthode repose sur la connaissance des distances séparant la cible de différents points de référence et des coordonnées spatiales de ces ancres [40].

Soient trois balises B_1, B_2 et B_3, M le nœud mobile que l'on désire localiser. L'exécution du protocole de mesure de distance a produit le triplet (d_1, d_2, d_3) et les échanges de données

permettent au mobile de connaître les positions des balises. Les équations (II-6), (II-7) et (II-8) décrivent la relation entre B_1, B_2 et M.

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = {d_1}^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = {d_2}^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 = {d_3}^2 \end{cases} \quad \text{(II-6)}$$

La position recherchée se trouve donc à l'intersection des cercles C_1 (B_1, d_1) et C_2 (B_2, d_2). Dans le cas général, C_1 et C_2 se rencontrent en deux points distincts M et M'. Grâce aux données de l'ancre B_3, l'un de ces deux candidats peut être retenu comme position du mobile [41].

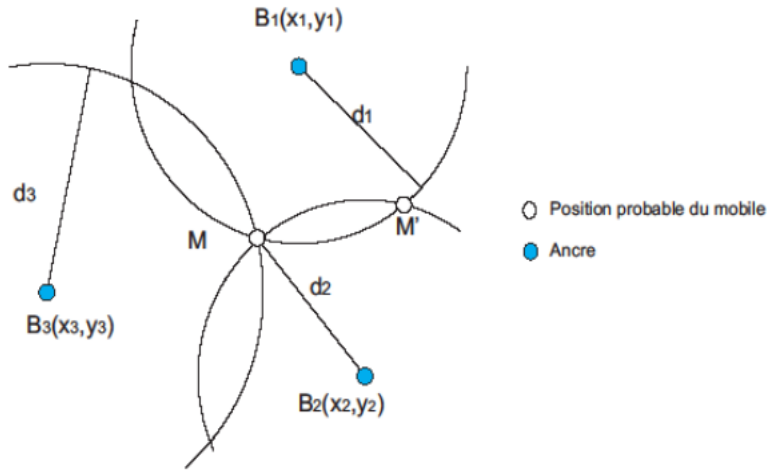


Figure II- 2 : Principe de la trilatération

II.2.6.2 Triangulation

L'angle d'incidence du signal émis par le mobile peut être utilisé pour retrouver sa position [42] Considérons deux balises B1(x1, y1) et B2(x2, y2) à portée du mobile M (x, y). Chacune dispose des moyens matériels de mesurer l'angle sous lequel elle reçoit le signal de M. Soient α et β ces deux angles.

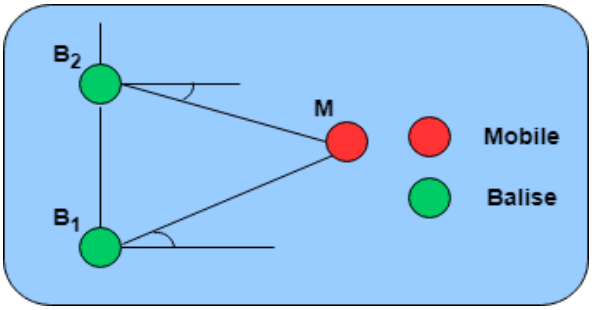


Figure II- 3 : Principe de triangulation

Le point M est déterminé par l'intersection des droites passant par les couples (B1, M) et (B2, M) figure (II-3). En définissant un nouveau repère dont l'origine est B_1 et où (B_1, B_2) se confond avec l'axe des ordonnées, le rapprochement des équations des droites conduit à l'expression (II-9) de la position de M [41].

$$M\left(\frac{Y_2}{\tan\alpha+\tan\beta};\frac{Y_2\tan\alpha}{\tan\alpha+\tan\beta}\right) \quad \text{(II-7)}$$

II.2.6.3 La Multilatération

Au même principe que la trilatération, en utilisant plus que trois points référence (ancres). La position d'un nœud est calculée en résolvant l'intersection de plusieurs hyperboles basées sur la différence des temps d'arrivée TDoA [43].

Soit une cible i, connaissant les positions (Xa, Ya) de m ancres ($1 \leq a \leq m$) ainsi que les distances dia, où dia représente la distance euclidienne entre i et l'ancre a.

Ayant ces informations et pour calculer la position (xi, yi) 1 de la cible nous formons le système suivant :

$$\begin{cases} (x_1 - x_i)^2 + (y_1 - y_i)^2 = d_{i1}^2 \\ (x_2 - x_i)^2 + (y_2 - y_i)^2 = d_{i2}^2 \\ (x_3 - x_i)^2 + (y_3 - y_i)^2 = d_{i3}^2 \\ \qquad\qquad . \\ \qquad\qquad . \\ (x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2 = d_{im}^2 \end{cases} \quad \text{(II-8)}$$

Ce système peut être linéarisé en soustrayant la dernière équation des (m−1) équations précédentes. En réordonnant les termes, nous obtenons un système d'équations linéaires. Ayant des erreurs dans les estimations de distances, il paraît qu'une solution exacte pour un tel système d'équations est presque impossible. La solution la plus proche de la solution exacte c'est au sens des moindres carrés [43].

II.2.7 Bilan sur les méthodes de dérivation de positions

Les trois techniques pour le calcul de la position ont été présentées, mais il convient de souligner que cette liste n'est pas exhaustive. Le choix de la méthode à utiliser dépend des données recueillies et des capacités de traitement disponibles Le Tableau **II-2** comparent les principales caractéristiques des trois méthodes présentées dans les paragraphes précédents

Tableau II- 2 : Comparaison des méthodes de dérivation de positions

Méthode	Nombre de références	Distance	Angle	Complexité temporelle	Défis
Trilatération	3	Oui	Non	O (1)	Sensible aux imprécisions des distances
Multilatération	M ≥ 3	Oui	Non	O (n^2)	Complexité du calcul
Triangulation	3	Non	Oui	O (1)	Besoin de matériel supplémentaire

II.3 Réseau de neurones

II.3.1 Introduction

Les réseaux de neurones sont des structures artificielles qui permettent d'aborder de manière innovante les problèmes liés à la perception, à la mémoire, à l'apprentissage et au raisonnement. Ils offrent des alternatives prometteuses pour contourner les limitations de l'informatique traditionnelle. Grâce à leur traitement parallèle de l'information et à leur inspiration des mécanismes des cellules nerveuses, les réseaux de neurones sont capables de générer des propriétés émergentes et de résoudre des problèmes qui étaient auparavant considérés comme complexes [44].

Dans le domaine de l'apprentissage et de la classification automatique, les réseaux de neurones artificiels sont parmi les outils les plus performants utilisés aujourd'hui. Dans cette partie, nous allons présenter les principes fondamentaux des réseaux neuronaux artificiels [44].

II.3.2 Définition

Un réseau de neurones est un modèle mathématique composé de neurones connectés entre eux par des poids. Ces neurones effectuent des calculs non-linéaires et fonctionnent en parallèle. Les réseaux de neurones artificiels sont utilisés pour résoudre des problèmes de traitement parallèle, d'apprentissage et de classification. Ils sont constitués de plusieurs couches de neurones, tels que la couche d'entrée, les couches cachées et la couche de sortie.

L'information se propage de la couche d'entrée aux couches suivantes jusqu'à la couche de sortie de manière unidirectionnelle [45].

II.3.3 Réseaux de neurones biologiques

Les neurones sont les éléments de traitement de l'information dans un cerveau biologique. Ils transmettent des informations sous forme de "potentiels d'action", des impulsions électriques qui se propagent le long de l'axone d'un neurone (pré-synaptique) jusqu'à une dendrite d'un autre neurone (post-synaptique). Une synapse est la jonction chimique entre l'axone et la dendrite, dont le "poids" détermine la quantité de courant électrique que le neurone post-synaptique reçoit du neurone pré-synaptique.

II.3.3.1 Caractéristiques

Dans leur organisation générale et leur système biochimique, les neurones présentent de nombreuses similitudes avec les autres cellules. Voici les caractéristiques des neurones biologiques :

- Recevoir des signaux en provenance de neurones voisins.
- Intégrer ces signaux.
- Engendrer un influx nerveux (message nerveux).
- Le conduire.
- Le transmettre à un autre neurone capable de le recevoir.

II.3.3.2 Structure

La structure d'un neurone se compose de 4 éléments distincts :

- Les dendrites : réceptrices des messages
- Le corps cellulaire : génère le potentiel d’action (la réponse)
- L'axone : transmettre le signal électrique généré par le corps cellulaire du neurone aux cellules nerveuses suivantes.
- Synapse : la communication entre les cellules nerveuses et joue également un rôle dans la modulation des signaux qui transitent dans le système nerveux.

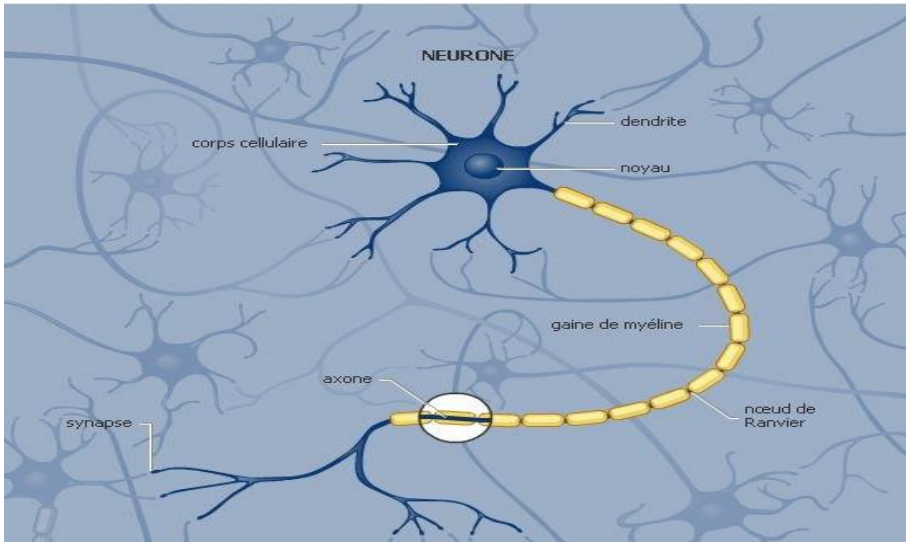


Figure II- 4 : Représentation schématique d'un neurone biologique

II.3.4 Réseaux de neurones formels

Un neurone formel, également appelé simplement "neurone", est une fonction algébrique non linéaire et bornée, qui utilise des coefficients ou des poids pour déterminer sa valeur. Cette fonction dépend des variables d'entrée du neurone, également appelées "entrées", et sa valeur de sortie est déterminée par ces entrées et les poids associés.

Un neurone est essentiellement un opérateur mathématique, dont la valeur numérique peut être calculée en utilisant un petit nombre de lignes de code informatique. Il est courant de représenter graphiquement un neurone sous la forme d'un schéma standard, tel que celui illustré sur la figure II-5 [46].

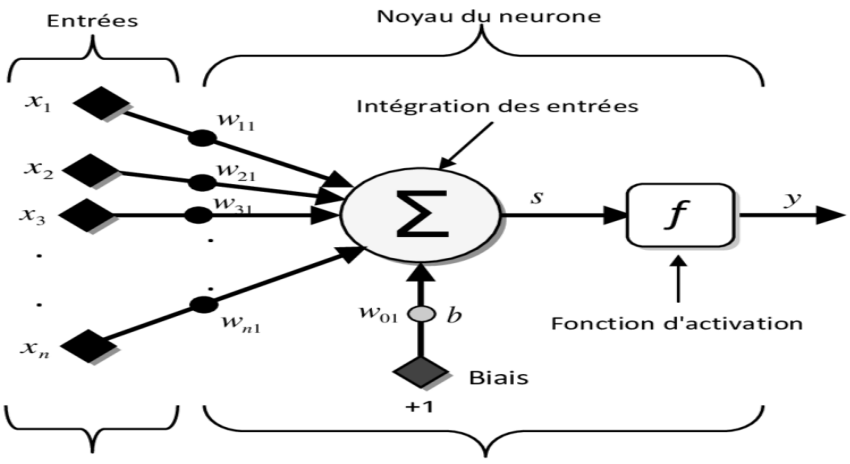


Figure II- 5 : La représentation schématique d'un neurone artificiel

Le modèle du neurone formel est proposé par W :M : Culloch et W:P itts en 1943 on en trouve:

- Les x_i C'est les vecteurs d'entrées.
- Les w_{ij} sont les poids synaptiques du neurone j
- Biais : entrée prend souvent les valeurs -1 ou +1 qui permet d'ajouter de la flexibilité réseau. En permettant de varier le seuil de déclenchement du neurone par l'ajustement des poids et du biais lors de l'apprentissage.
- Noyau : intègre toutes les entrées et le biais et calcul la sortie du neurone selon une fonction d'activation qui est souvent non linéaire pour donner une plus grande flexibilité d'apprentissage

Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées. Le résultat S de cette somme est ensuite transformé par une fonction de transfert F qui produit la sortie y du neurone. Les n entrées du neurone correspondent au vecteur $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, alors que $w = [w_{11}, w_{21}, \dots, w_{n1}]^T$ représente le vecteur des poids du neurone. La sortie s de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante [47] :

$$s = \sum_{i=0}^{n} w_{i1}\, x_i \pm \mathrm{b} \qquad \text{(II-9)}$$

Le résultat S de la somme pondérée s'appelle le niveau d'activation du neurone. Le biais b s'appelle aussi le seuil d'activation du neurone. Lorsque le niveau d'activation atteint ou dépasse le seuil, alors l'argument devient positif (ou nul). Sinon, il est négatif [47] .

Les réseaux de neurones sont caractérisés par l'architecture (l'organisation des neurones), l'apprentissage (méthode de détermination des poids de connexions), et par leur fonction d'activation.

II.3.5 Correspondance neurone biologique/formel

Le tableau suivant peut être utilisé pour résumer la modélisation du neurone formel en fonction du neurone biologique.

Tableau II- 3 : Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel

Neurone biologique	Neurone formel
Dendrites	Signal d'entrée
Axones	Signal de sortie
Synapses	Poids des connexions
Noyau ou Somma	Fonction d'activation

II.3.6 Fonction d'activation

La fonction d'activation est une fonction mathématique qui a pour rôle de transformer le signal entrant dans un neurone en une réponse ou un signal de sortie. Son objectif est de normaliser la sortie de chaque neurone et d'introduire des complexités non-linéaires dans le réseau. Le choix de la fonction d'activation est crucial pour la performance du réseau neuronal. La non-linéarité des fonctions d'activation permet de transformer le résultat de la somme pondérée des entrées d'un neurone en une valeur de sortie plus significative pour le réseau. Cette capacité permet aux réseaux de neurones d'apprendre des données complexes [48].

Parmi les fonctions d'activation les plus utilisées, nous citons : Sigmoïde, Relu et Softmax.

II.3.6.1 Fonction Linéaire

C'est une fonction simple de la forme :

$$f(x) = ax \tag{II-10}$$

La fonction Linéaire convertit ses entrées en sortie sans une très grande modification ou alors sans aucune modification. Nous restons ici dans une situation de proportionnalité (quand on peut passer d'une série de nombres à une autre, en multipliant ou en divisant par un même nombre). Elle est utilisée en couche de sortie lorsqu'il s'agit d'une régression [49] .

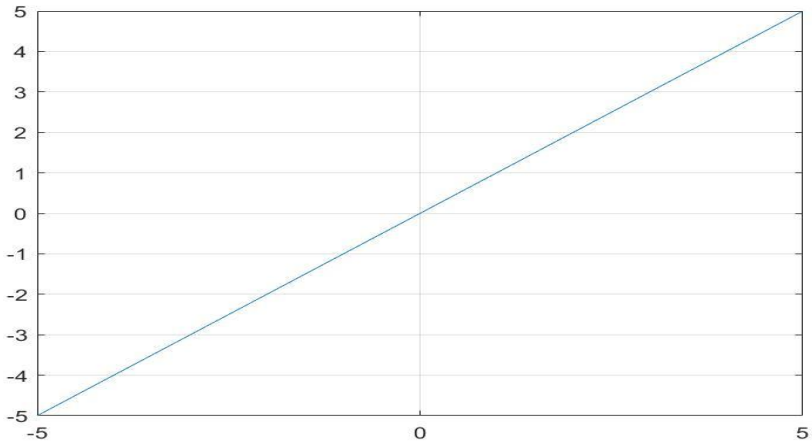


Figure II- 6 : Fonction Linéaire

II.3.6.2 Fonction Sigmoïde

La fonction sigmoïde est considérée comme l'une des fonctions d'activation les plus anciennes et les plus utilisées en raison de ses propriétés de non-linéarité, de continuité différentielle et de facilité de dérivation [50]. Elle permet d'introduire de la non-linéarité dans

le réseau neuronal. La sortie de la fonction sigmoïde est comprise entre 0 et 1. Elle est définie mathématiquement de la manière suivante [51] :

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \tag{II-11}$$

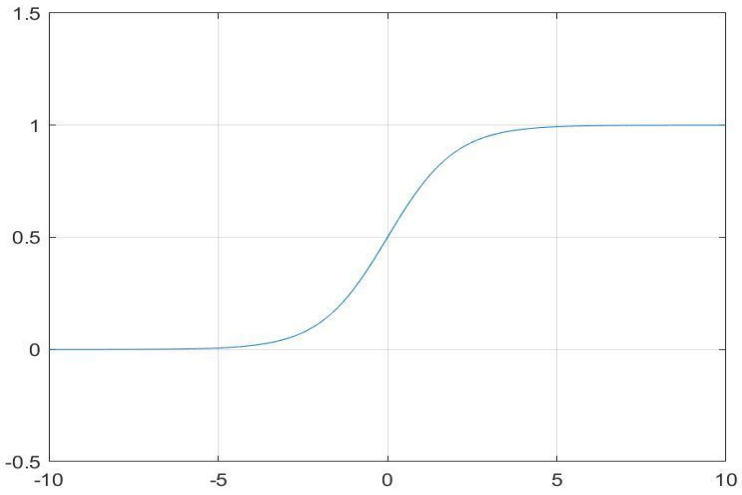


Figure II- 7 : Fonction Sigmoïde

II.3.6.3 Fonction d'unité linéaire rectifiée (ReLU)

La fonction ReLU se distingue par sa grande efficacité de calcul par rapport à la fonction sigmoïde, ce qui est indispensable pour optimiser les réseaux neuronaux profonds [50]. Elle est définie mathématiquement de la manière suivante [51] :

$$f(x) = \max(0, x) = \begin{cases} x, & si\ x \geq 0 \\ 0, & si\ x < 0 \end{cases} \tag{II-12}$$

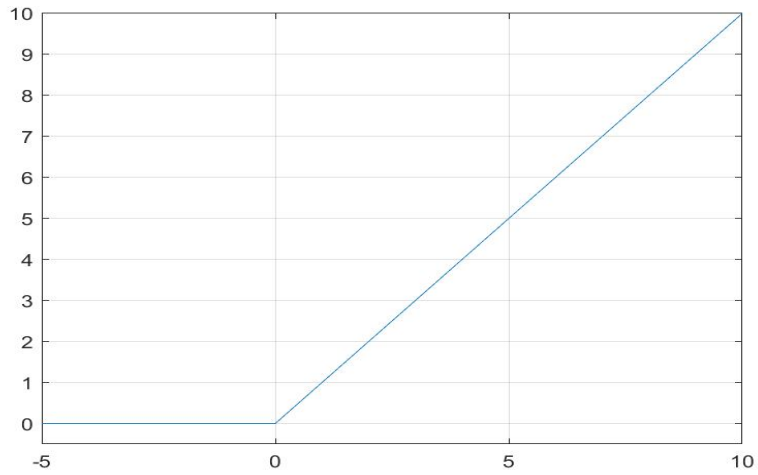


Figure II- 8 : Fonction d'unité linéaire rectifiée (ReLU)

II.3.6.4 Fonction Softmax

La fonction Softmax est un autre type de fonction d'activation utilisée dans les réseaux neuronaux. Elle est utilisée pour calculer la distribution de probabilité à partir d'un vecteur de nombres réels. La fonction Softmax produit une sortie qui est une plage de valeurs entre 0 et 1, avec la somme des probabilités égale à 1. La fonction Softmax est calculée en utilisant la relation suivante [51] :

$$f(x_i) = \frac{e^{xi}}{\sum_j e^{xj}} \qquad \text{(II-13)}$$

La fonction Softmax est utilisée dans les modèles multi-classes où elle renvoie les probabilités de chaque classe, la classe ciblée ayant la probabilité la plus élevée. La fonction Softmax apparaît dans presque toutes les couches de sortie des architectures de deep learning, où elles sont utilisées [51].

II.3.6.5 Fonction Tangente Hyperbolique

La fonction Tangente Hyperbolique (Tanh) similaire à la fonction Sigmoïde. La différence avec la fonction Sigmoïde est que la fonction Tanh produit un résultat compris entre -1 et 1. Elle produit généralement de meilleurs résultats que la fonction Sigmoïde en raison de sa symétrie, où ses petites entrées négatives tendent vers -1 et ses grandes entrées positives tendent vers 1. Idéale pour les perceptrons multicouches, en particulier, pour les couches cachées [49].

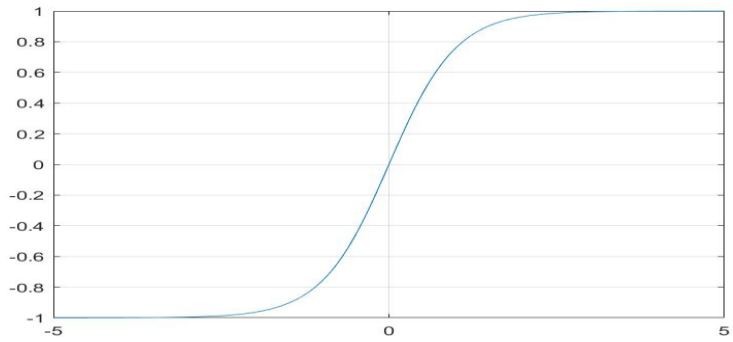


Figure II- 9 : Fonction Tangente Hyperbolique

II.3.7 Architecture des réseaux de neurones

Suivant la logique d'interconnexion choisie, les réseaux de neurones se distinguent en deux grandes familles : les réseaux non bouclés (statiques) et les réseaux bouclés (dynamiques).

II.3.7.1 Réseau de neurones non bouclé (feed-forward)

Un réseau de neurones non bouclé est représenté par un ensemble de neurones interconnectés, où l'information circule des entrées vers les sorties sans retour en arrière possible. Concrètement, si l'on suit les connexions à partir d'un neurone donné, on ne peut pas revenir à celui de départ. Les réseaux de neurones non bouclés sont des outils statiques qui servent principalement à approximer des fonctions non linéaires et à modéliser des processus non linéaires [52].

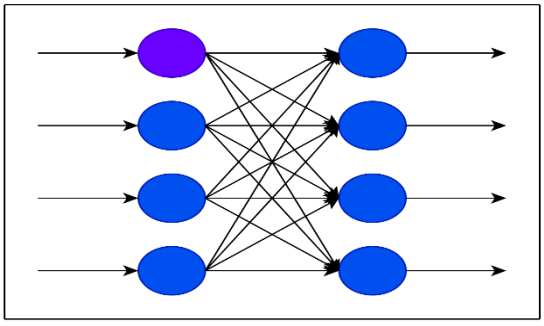


Figure II- 10 : Réseau non bouclé à connexions totale

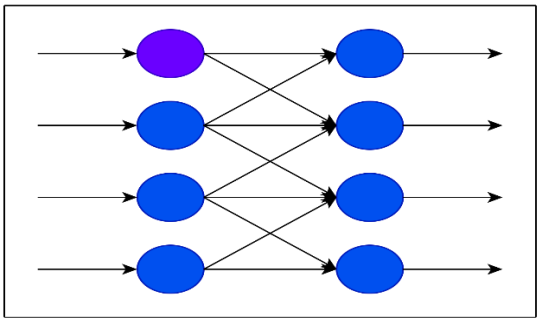


Figure II- 11 : Réseau non bouclé à connexions partielles

II.3.7.2 Réseau de neurones bouclé (feed-back)

Les réseaux de neurones boucles, également appelés réseaux de neurones récurrents, sont des réseaux qui produisent des boucles de flux internes. Leurs sorties dépendent des entrées

à un instant donné, ainsi que des entrées précédentes. Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière dans le sens de la propagation, ce qui ajoute un effet de mémorisation du passé. Car ceci n'est pas considéré comme une dynamique de systèmes à temps discrets, régis par une ou plusieurs équations aux différences non-linéaires, résultant de la composition des fonctions réalisées par chacun des neurones et des retards associés à chacune des connexions. Ils ne sont pas utilisés pour la modulation et l'adaptation de la dynamique du système, les commandes de processus ou la filtration [52].

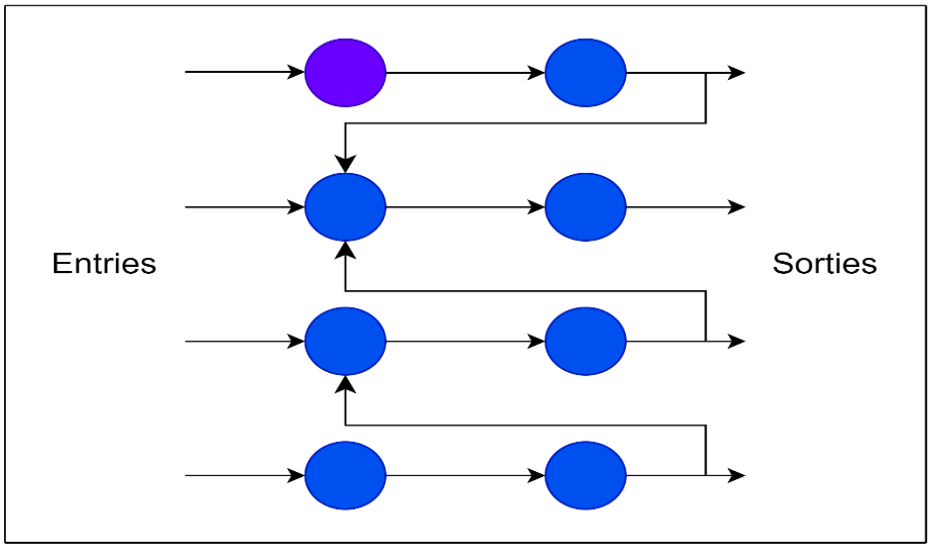


Figure II- 12 : Réseau non bouclé à connexions partielles

II.3.8 Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est vraisemblablement la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux. Elle ne concerne cependant pas tous les modèles, mais les plus utilisés [53].

II.3.8.1 Définition

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement [53].

II.3.8.2 Type d'apprentissage

Il existe trois types d'apprentissage qui sont les suivants :

II.3.8.2.1 Apprentissage supervisé

C'est actuellement le mode d'apprentissage le plus couramment utilisé. Son principe est élémentaire : on soumet au réseau un grand nombre d'exemples pour lesquels l'entrée et la sortie associée sont connues et les poids sont modifiés de façon à corriger l'erreur entre la sortie

désirée et la réponse du réseau à l'entrée correspondante. Le plus répandu des algorithmes d'apprentissage supervisé est l'algorithme de rétro-propagation d'erreur par descente de gradient qui utilise la dérivée de la fonction de transfert des neurones pour calculer l'erreur.[54] L'avantage de cet algorithme c'est qu'il peut être utilisé à des réseaux multicouches. Ainsi, l'erreur est obtenue à la sortie puis propagé en amont d'une couche à l'autre jusqu'à la couche d'entrée [54].

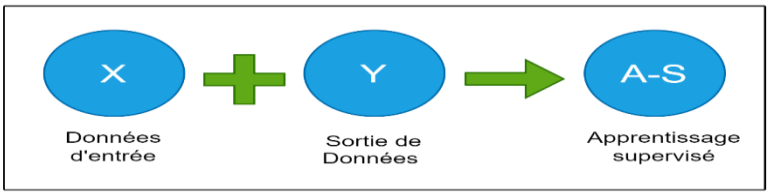


Figure II- 13 : Apprentissage supervisé

On distingue deux types de problèmes d'apprentissage supervisé [55] :

- **Classification**

La classification consiste à trouver le lien entre une variable d'entrée (X) et une variable de sortie discrète (Y) en utilisant une distribution multinomiale comme modèle. Son objectif est de catégoriser de nouveaux exemples en fonction des caractéristiques observées dans les données d'entrée, afin de prédire la classe ou la catégorie correspondante.

- **Régression**

La régression consiste à estimer une valeur continue pour la variable de sortie. Son objectif est de trouver une relation mathématique entre une variable d'entrée et une variable de sortie afin de prédire de manière précise et continue la valeur de sortie correspondante en fonction des caractéristiques observées dans les données d'entrée.

II.3.8.2.2 Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé consiste à ajuster les poids d'un réseau neuronal à partir d'un ensemble d'apprentissage qui ne fournit aucune information sur les résultats souhaités. L'objectif de cet apprentissage est de détecter les similitudes et les différences dans les données d'apprentissage. Les poids et les sorties du réseau convergent vers des représentations qui capturent les régularités statistiques des données [56] [56] Ce type d'apprentissage est souvent qualifié de compétitif et/ou coopératif.[56] L'apprentissage non supervisé présente l'avantage d'une grande capacité d'adaptation, souvent appelée auto-organisation. Il est couramment utilisé dans le traitement du signal et l'analyse factorielle [57].

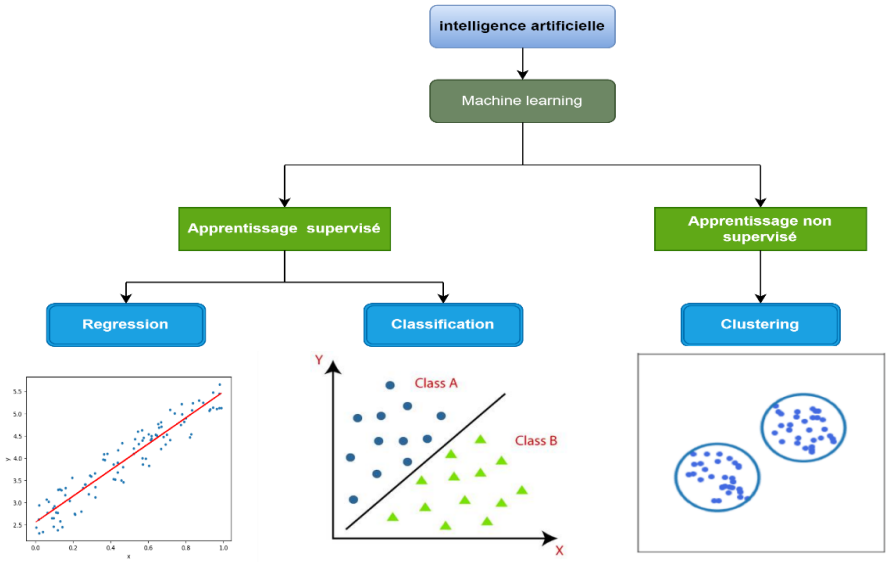


Figure II- 14 : Détails des apprentissages supervisés et non supervisé

II.3.8.2.3 Apprentissage renforcé

L'apprentissage renforcé est une technique similaire à l'apprentissage supervisé à la différence qu'au lieu de fournir des résultats désirés au réseau, on lui accorde plutôt un grade (ou score) qui est une mesure du degré de performance du réseau après quelques itérations. Les algorithmes utilisant la procédure d'apprentissage renforcé sont surtout utilisés dans le domaine des systèmes de contrôle [58].

II.3.9 Algorithme d'apprentissage

L'apprentissage est une phase de développement du réseau de neurones durant laquelle le comportement de réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Cette phase nécessite des exemples d'apprentissage et un algorithme d'apprentissage. Le problème d'optimisation consiste à trouver les coefficients du réseau minimisant une fonction d'erreur globale, appelée fonction de coût. Cette optimisation se fait de manière itérative, en modifiant les poids en fonction du gradient de la fonction de coût. L'algorithme d'apprentissage le plus communément utilisé est celui de rétro-propagation de l'erreur [59].

II.3.9.1 L'algorithme de la rétro-propagation du gradient : (back-propagation)

Le bloc de construction le plus fondamental de l'apprentissage en profondeur est la rétropropagation, abréviation de propagation en arrière des erreurs, un algorithme utilisé pour entraîner les réseaux de neurones en apprentissage supervisé. Bien que la rétro-propagation ait été inventée dans les années 1970, elle a été popularisée plusieurs années plus tard, en 1989, par Rumelhart, Hinton et Williams dans leur article "Learning representations by

backpropagating errors". Cet algorithme permet de calculer l'erreur pour chaque neurone, de la dernière couche vers la première, et ce pour tous les paramètres du réseau [60][61].

L'algorithme de rétro-propagation du gradient se déroule en deux phases :

- Calculer l'erreur de sortie et comparer la sortie avec le résultat attendu
- Propager l'erreur de couche en couche vers l'arrière

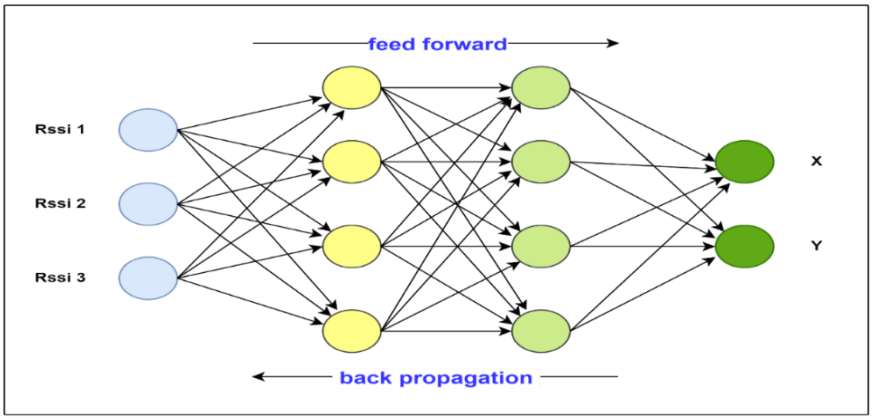


Figure II- 15 : Illustration du principe de rétro-propagation

II.3.9.2 Fonction Coût (Cost Function)

Nous avons introduit l'erreur entre le modèle et les données. L'ensemble de ces erreurs est représenté par une fonction coût (En anglais Cost ou loss function). Cette fonction peut être définie avec plusieurs fonctions, l'une des plus fréquemment utilisée est l'erreur quadratique moyenne (Mean squared error), tel que :

$$E = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} (y_i - \hat{y}_i)^2 \qquad \text{(II-14)}$$

Où y_i est la valeur désirée, $\hat{y}$ est la sortie du réseau et i et l'indice de la sortie (première sortie, deuxième sortie …). M est le nombre d'entrée du réseau. Il est clair que la valeur de la fonction de coût est proportionnelle à l'erreur [56] [57].

II.3.9.3 L'algorithme de descente de gradient

L'algorithme de descente du gradient utilise le résultat de l'algorithme de rétropropagation pour mettre à jour les paramètres. Il cherche à minimiser la fonction de coût $E(x)$ en modifiant. Il est itératif et procède par améliorations successives. Son but est de trouver ou de s'approcher d'un point stationnaire ou minimum global, c'est à dire d'un point où le gradient de la fonction de coût est nul et ainsi aboutir à une configuration stable du réseau neuronal. Le principe de cet algorithme remonte à 1847 avec Cauchy [60].

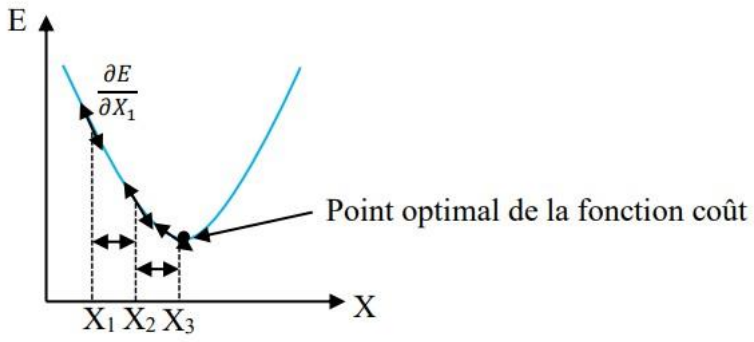


Figure II- 16 : Optimisation de la fonction coût par descente de gradient

Comme il est illustré sur la Figure II-16, l'algorithme utilise les dérivées partielles de l'erreur par rapport aux poids pour avancer vers le point optimal suivant un pas déterminé. La formule de mise à jour des paramètres est :

$$w_t = w_{t-1} - \Delta w_t \ , \ \Delta w_t = \alpha * \frac{\partial E}{\partial W} \qquad \text{(II-15)}$$

Le paramètre W se met à jour de manière itérative à l'aide d'un taux d'apprentissage α strictement positif qui permet de régler la vitesse de convergence.

La descente de gradient peut s'effectuer de plusieurs manières :

- De manière globale (*batch gradient*) : on envoie au réseau toutes les données en une seule fois, puis le gradient est calculé et les poids ajustés.
- Par des lots (*mini-batch gradient*) : on envoie au réseau les données par petits groupes d'une taille définie par l'expérimentateur dont on calcule les erreurs, puis l'erreur moyenne est calculée et enfin les poids sont mis à jour.
- De façon unitaire, stochastique (*stochastic gradient*) : cette méthode envoie une seule donnée à la fois dans le réseau et donc les poids sont mis à jour à chaque fois juste après.

II.3.10 Applications

Les réseaux de neurones artificiels sont actuellement utilisés dans de nombreux domaines, couvrant un large éventail d'applications [62].

- **Traitement d'images :** reconnaissance de caractères et de signatures, compression d'images, reconnaissance de forme, cryptage, classification, etc.

- **Traitement du signal :** traitement de la parole, identification de sources, filtrage, classification, ...
- **Contrôle :** diagnostic de pannes, commande de processus, contrôle qualité, robotique.
- **Traitement automatique des langues :** segmentation en mots, représentation sémantique
  des mots, étiquetage morphosyntaxique, traduction automatique,
- **Optimisation :** allocation de ressources, planification, régulation de trafic, finance.

II.3.11 Les avantages et les inconvénients de réseaux de neurone

➢ **Avantage des réseaux de neurones**

- Capacité de représenter n'importe quelle fonction, linéaire ou pas, simple ou complexe.
- Les réseaux de neurones sont capables de tolérer des données bruitées, ainsi que capable de classer les modèles sur lesquels ils ne sont pas été entrainés.
- Ils peuvent être utilisés lorsque nous avons peu d'informations sur la relation entre les attributs et les classes.
- Bien adapté pour les entrées et les sorties d'une valeur continue.
- Le succès sur plusieurs applications du monde réel comme la reconnaissance manuscrite de caractère, de la pathologie et de médecine de laboratoire, et beaucoup plus [63].

➢ **Inconvénients**

- Nécessitent un long temps d'apprentissage, donc ils sont adaptables aux applications dont ceci est faisable.
- Pauvre interprétation de la connaissance représentée sous la forme d'un réseau d'unités connectées par des liens pondérés.
- Exigent un nombre de paramètres qui doivent être déterminées empiriquement, par exemple la topologie du réseau et sa structure, le nombre de couches cachées, le nombre d'unités dans chaque couche cachée et dans la couche de sortie [63].

II.4 Conclusion

En conclusion, la localisation dans les réseaux de capteurs sans fil est un domaine de recherche et de développement en constante évolution. Les techniques traditionnelles et l'intégration de l'intelligence artificielle offrent des possibilités intéressantes pour améliorer la précision et la fiabilité de la localisation. Il est essentiel de continuer à explorer de nouvelles approches et à relever les défis techniques afin de réaliser le plein potentiel des réseaux de capteurs sans fil dans des domaines tels que l'Internet des objets, la surveillance environnementale.

Chapitre 3

Conception et implémentation du système de localisations

III.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous allons présenter l'implémentation pratique d'une application de localisation basée sur des nœuds sans fil. La première partie est dédiée à la description matérielle et logicielle des composants constituant les nœuds. Dans la deuxième partie, nous allons exposer la méthode de collecte de données utilisée dans notre application. Par la suite, dans la troisième partie, qui est la partie la plus importante de notre travail, nous utiliseront deux modèles basés sur l'intelligence artificielle pour estimer les positions. Enfin, nous compareront les performances des modèles d'estimation afin de déterminer le modèle le plus adapté à cette application.

III.2 Présentation du moyen hardware et software :

III.2.1 Architecture du système :

Pour la réalisation de notre système de localisation, nous avons adopté une architecture basée sur un réseau de capteurs sans fil, comme illustré dans la Figure III-1 Ce réseau de capteurs est essentiel pour la collecte des données de localisation et joue un rôle clé dans notre système.

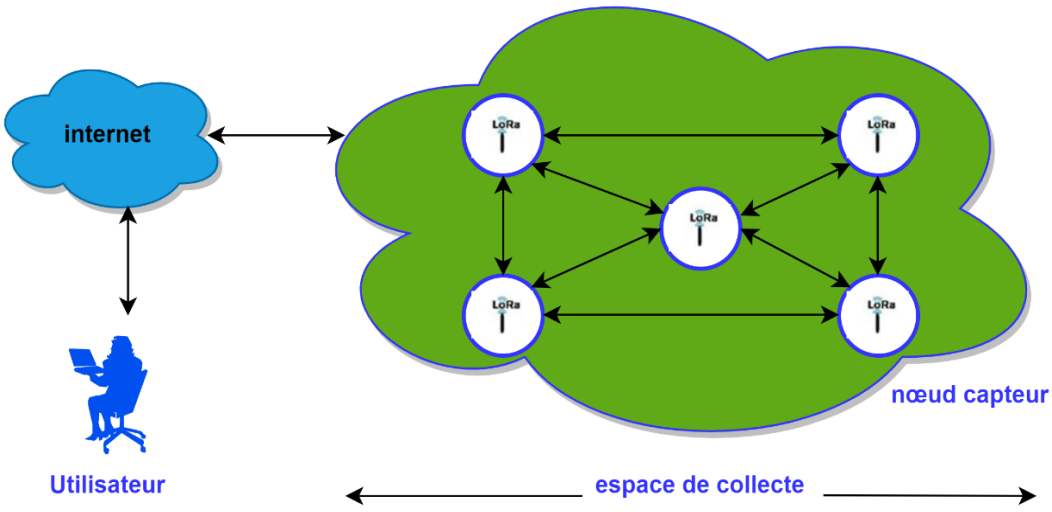


Figure III- 1 : Architecture d'un réseau de capteur

Dans cette architecture, nous avons configuré quatre nœuds fixes qui sont programmés en utilisant l'ESP32 avec Arduino IDE en mode réception. Ces nœuds sont responsables de recevoir les signaux émis par le nœud mobile, qui agit comme l'émetteur dans notre système.

III.2.2 Schéma bloc des nœuds

Le schéma bloc des nœuds offre une représentation visuelle des différents composants utilisés dans les nœuds.

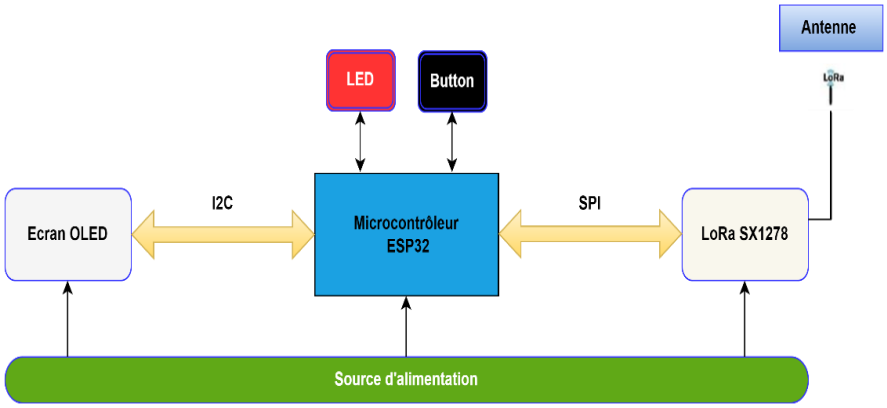


Figure III- 2 : Schéma du bloc des nœuds

III.2.3 Le microcontrôleur ESP32

III.2.3.1 Description de l'ESP32

ESP32 est une série de microcontrôleurs à faible coût et à faible consommation d'énergie sur puce avec Wi-Fi intégré et Bluetooth (Classique et BLE). La série ESP32 utilise un microprocesseur Tensilica Xtensa LX6 dans des variantes à double cœur et à cœur unique et comprend des commutateurs d'antenne intégrés, un balun RF, un amplificateur de puissance, un amplificateur de réception à faible bruit, des filtres et des modules de gestion de l'alimentation. ESP32 est créé et développé par Espressif Systems, et est fabriqué par TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) en utilisant leur processus de 40 nm [64].

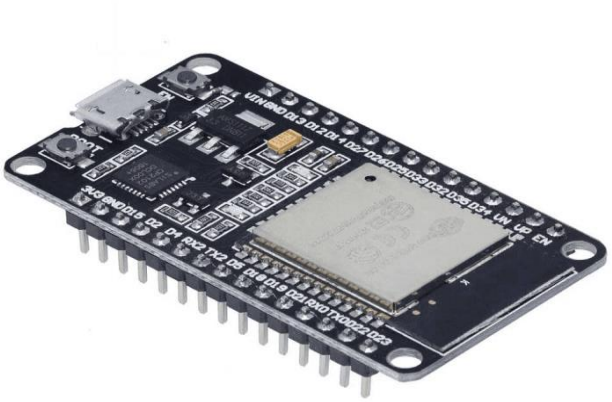


Figure III- 3 : Modèle ESP32 (WROOM-32)

III.2.3.2 Les caractéristiques techniques

Processeurs :

- ✓ CPU : microprocesseur Xtensa dual-core (ou single-core) 32 bits LX6, fonctionnant à 80 ou 240 MHz et fonctionnant jusqu'à 600 DMIPS.
- ✓ Coprocesseur ultra basse consommation (ULP).

Mémoire RAM : 520 KB SRAM

Mémoire ROM : 4 MB

Connectivité sans fil :

- Wi-Fi : 802.11 b / g / n, Le module Wi-Fi fonctionne dans une plage de 2,4 GHz à 2,5 GHz.
- Bluetooth : v4.2 BR / EDR et BLE (partage la radio avec Wi-Fi).

- ✓ Trois modes de fonctionnement : 1. Point d'accès. 2. Client. 3. Point d'accès + station
- ✓ Microprocesseur à double cœur de 32 bits
- ✓ La tension de fonctionnement est de 3,3 V
- ✓ Fréquence d'horloge de 80 MHz et va jusqu'à 240 MHz
- ✓ La mémoire ROM est de 448 Ko
- ✓ La mémoire flash externe est prise en charge et peut aller jusqu'à 32 Mo, c.-à-d. 4 Mo
- ✓ L'intensité maximale dans chaque broche est de 12 mA, mais il est recommandé d'utiliser 6 mA
- ✓ Il dispose de 36 broches d'entrée/sortie à usage général
- ✓ Les broches d'entrée et de sortie à usage général sont dotées des fonctionnalités PWM/I2C et SPI
- ✓ Tension de fonctionnement de 2 à 3,6 V
- ✓ Flux de sommeil profond de 2,5 µA
- ✓ Support tactile capacitif à 10 électrodes
- ✓ La température de fonctionnement est comprise entre -40 °C et +125 °C

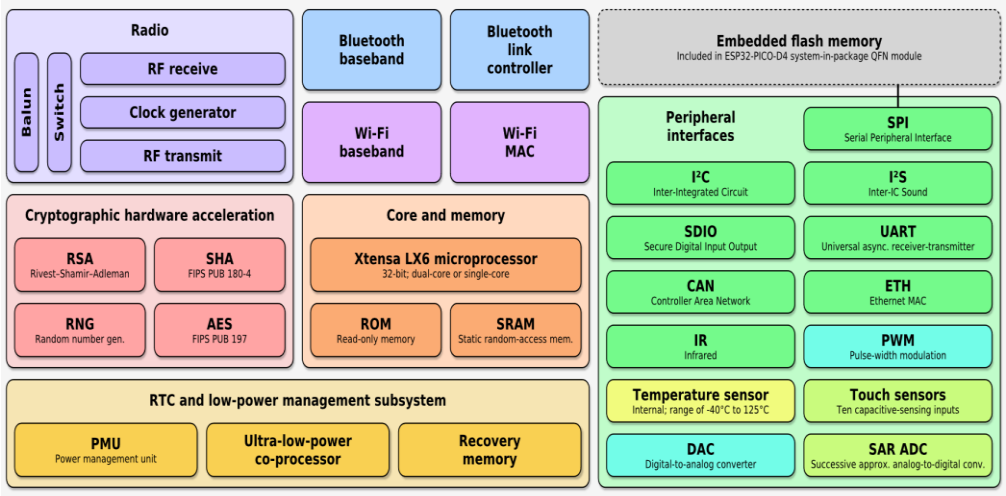


Figure III- 4 : Schéma fonctionnel ESP32

III.2.3.3 Brochage de la carte de développement ESP32

La carte de développement ESP32 dispose d'un total de 30 broches qui lui permettent de se connecter au monde extérieur. Les connexions sont les suivantes :

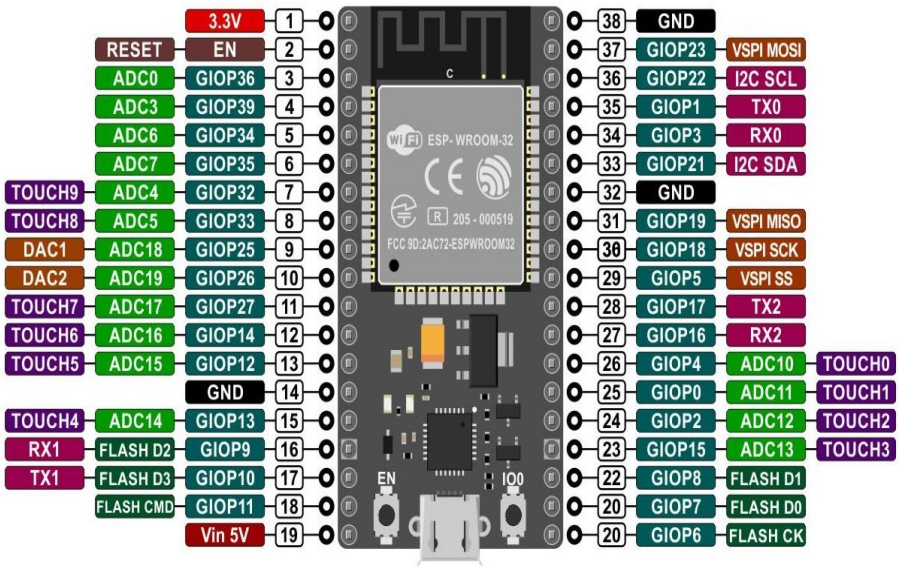


Figure III- 5 : Pinout de l'ESP32 WROOM-32

Broches d'alimentation : deux broches d'alimentation sont disponibles à savoir : Broche VIN et broche 3,3 V. La broche VIN peut être utilisée pour alimenter directement l'ESP32 et ses périphériques, si vous avez une source de tension 5V régulée. La broche 3,3 V est la sortie d'un

régulateur de tension intégré. Cette broche peut être utilisée pour alimenter des composants externes.

GND : est une broche de masse de la carte de développement ESP32.

Broches GPIO : La carte de développement ESP32 possède 25 broches GPIO qui peuvent être affectées à diverses fonctions par programmation. Chaque GPIO activé numérique peut être configuré en pull-up ou pull-down interne, ou réglé en haute impédance. Lorsqu'il est configuré comme entrée, il peut également être défini sur fronttrigger ou level-trigger pour générer des interruptions CPU.

Pins UART : La carte de développement ESP32 possède 2 interfaces UART, à savoir UART0 et UART2, qui fournissent une communication asynchrone (RS232 et RS485) et un support IrDA, et communiquent jusqu'à 5 Mbps. UART fournit également la gestion matérielle des signaux CTS et RTS et le contrôle de flux logiciel (XON et XOFF).

Capteur à effet Hall : L'ESP32 intègre un capteur Hall basé sur une résistance à porteuse N. Lorsque la puce est dans le champ magnétique, le capteur Hall développe une petite tension latéralement sur la résistance, qui peut être directement mesurée par l'ADC.

Capteur tactile : L'ESP32 dispose de 10 GPIO à détection capacitive, qui détectent les variations induites par le contact ou l'approche des GPIO avec un doigt ou d'autres objets. La nature à faible bruit de la conception et la haute sensibilité du circuit permet d'utiliser des plots relativement petits. Des tableaux de tampons peuvent également être utilisés, de sorte qu'une plus grande zone ou plusieurs points peuvent être détectés [64].

III.2.4 Comparaison des caractéristiques techniques d'ESP32

Notre choix de l'ESP32 par rapport à d'autres cartes se justifie pour plusieurs raisons, le tableau ci-dessous présente les caractéristiques techniques de quelques autres cartes :

Tableau III- 1 : Comparaison des caractéristiques techniques

Caractéristiques	Esp32	Arduino Due	Raspberry Pi Pico	STM32 Blue Pill
Processeur	Dual-core Tensilica LX6 cadencé jusqu'à 240 MHz	ARM Cortex-M3 cadencé jusqu'à 84 MHz	ARM Cortex-M0+ cadencé jusqu'à 133 MHz	ARM Cortex-M3 cadencé jusqu'à 72 MHz
Mémoire RAM	Jusqu'à 520 Ko	264 Ko	96 Ko	Jusqu'à 20 Ko
Mémoire Flash	Jusqu'à 16 Mo	2 Mo	512 Ko	Jusqu'à 128 Ko
Bluetooth	Bluetooth v4.2 BR/EDR et BLE	Non	Non	Non
Wi-Fi	802.11 b/g/n/e/i	Non	Non	Non
Interfaces	SPI,I2C, UART, ADC,DAC, RMT(Remote Control), I2S	CAN, DAC, PWM, SPI,I2C,UART,ADC	SPI, I2C, UART, ADC	DAC,PWM, SPI,I2C,UART, ADC
GPIO	34 broches GPIO	26 broches GPIO	54 broches GPIO	37 broches GPIO
Consommation	Entre 80 et 260 mA	Entre 1,5 et 67 mA	Entre 25 et 500 mA	Entre 5 et 30 mA
Langage de programmation	Espressif IDF, Arduino IDE, CircuitPython	C/C++	Micropython, CircuitPythn, C/C++, Arduino	C alike, Arduino IDE

L'ESP32 est une carte puissante et polyvalente, offrant une puissance de traitement élevée, une interface série étendue, une grande capacité de mémoire et une connectivité WiFi, ce qui en fait un excellent choix pour de notre projet.

III.2.5 Module LoRa : le composant SX1278

Les émetteurs-récepteurs SX1278 sont équipés du modem long portée LoRa (TM) qui fournit des communications à spectre étalé et haute immunité aux interférences tout en minimisant le courant de consommation. En utilisant la technique de modulation LoRa (TM) brevetée de Semtech, le SX1278 peut atteindre une sensibilité de plus de -148 dBm

La haute sensibilité combinée à l'amplificateur de puissance +20 dBm intégré donnent budget de liaison leader de l'industrie, ce qui le rend optimal pour toute application nécessitant une portée ou une robustesse.

LoRa (TM) offre également des avantages significatifs à la fois en termes de blocage et de sélectivité par rapport aux techniques de modulation, résolvant le compromis de conception traditionnel entre la portée, les interférences immunité et consommation d'énergie.



Figure III- 6 : Le module LoRa[65]

III.2.5.1 Caractéristiques techniques

Le module LoRa SX1278 est doté du circuit intégré RF SX1278 et propose des fonctionnalités similaires à celles du SX1278 (Modem LoRa (TM)) [66] :

- Fréquences de support : 433 MHz, 470 MHz, 868 MHz ou 915 MHz selon la version
- Tension de fonctionnement : de 1,8 V à 3,7 V
- Courant de sortie maximal : 120 mA
- Consommation de courant en réception : 10 mA

- Consommation de courant en veille : moins de 1 µA
- Sensibilité de réception élevée : aussi basse que -148 dBm
- Puissance de sortie maximale : 20 dBm (environ 100 mW)
- Interface SPI pour le contrôle et la communication avec le microcontrôleur
- Capacité de transmission de données allant jusqu'à 300 kbps
- Support de diverses fonctions de sécurité et de cryptage pour garantir la sécurité des données,
- Température de fonctionnement : -20 °C à +70 °C
- Dimensions : 17 mm x 16 mm x 3.2(±0.2) mm

III.2.5.2 Broches du module

Cette version de module de SX1278 a 12 broches pour l'interfaçage avec le microcontrôleur et deux broches supplémentaires pour l'antenne.

Tableau III. 1 : brochages du module

Pin	Name	Description
1	GND	Ground (0 V)
2	D101	Digital I/O
3	D102	Digital I/O
4	D103	Digital I/O
5	VCC	Power (3.6 V Max)
6	MISO	SPI Data Output
7	MOSI	SPI Data Input
8	SCLK	SPI SCLK
9	NSS	SPI Chip Select
10	D100	Digital I/O
11	RESET	Reset
12	GND	Ground (0 V)

Le type d'antenne de ce module est hélicoïdal. Elle présente plusieurs paramètres essentiels, notamment le S11 (coefficient de réflexion) et le diagramme de rayonnement. Ces paramètres sont importants pour évaluer l'adaptation d'impédance de l'antenne et sa performance en termes de directionnalité des signaux.

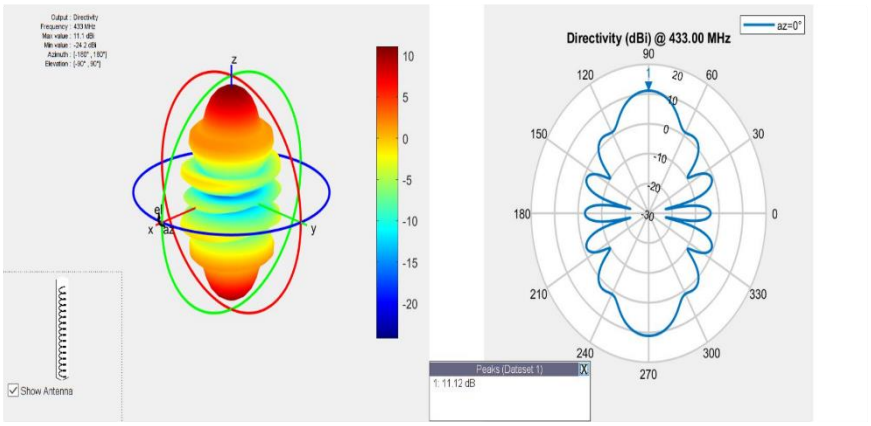


Figure III- 7 : diagramme de rayonnement en (3D et 2D)

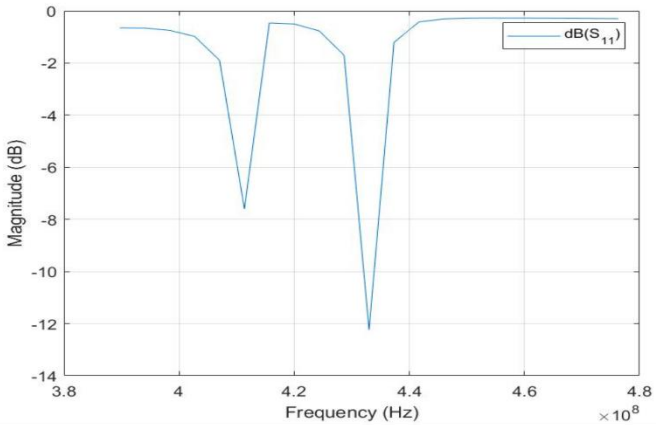


Figure III- 8 : S11 en fonction de la fréquence

III.2.5.3 Choix d'antenne

Pour notre projet, nous avons décidé d'utiliser deux types d'antennes différents. Pour les nœuds d'émission, nous avons choisi une antenne quarte de pôle chargé, tandis que pour les nœuds fixes en mode réception, nous avons opté pour une antenne dipôle. Cette décision a été motivée par les résultats insatisfaisants obtenus avec les antennes intégrées aux modules, notamment un RSSI de -98 dB à une distance de 10 mètres, pour assurer une communication sans fil fiable et efficace avec le module LoRa.

III.2.5.4 Antenne quarte de pôle chargé et dipôle

L'antenne quarte de pôle chargé et dipôle possède plusieurs paramètres essentiels, tels que le S11 et le diagramme de rayonnement.

- Le coefficient de réflexion faible indique une bonne adaptation de l'antenne et une transmission efficace de l'énergie. Un S11 élevés peut signaler des problèmes d'adaptation d'impédance ou de mauvaise performance de l'antenne [67].
- Le diagramme de rayonnement est une représentation graphique montrant comment l'antenne émet des ondes électromagnétiques dans l'espace [67].

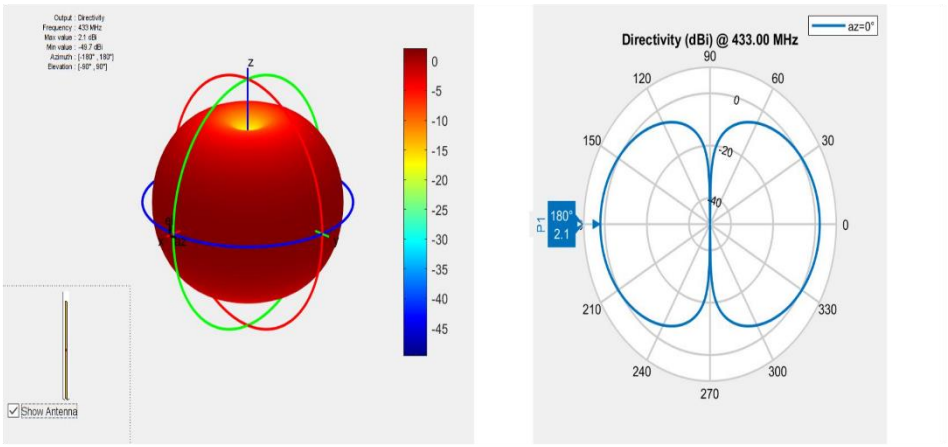


Figure III- 9 : Diagramme de rayonnement de L'antenne dipôle en (3D et 2D)

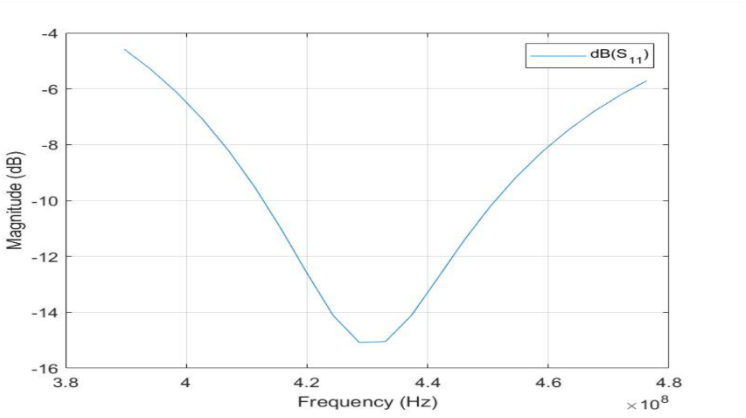


Figure III- 10 : S11 en fonction de la fréquence de L'antenne dipôle

L'antenne quarte de pôle chargée est similaire à l'antenne quart de pôle. Dans ce qui suit, nous vous présentons une figure représentant le diagramme de rayonnement ainsi que le coefficient de réflexion de l'antenne.

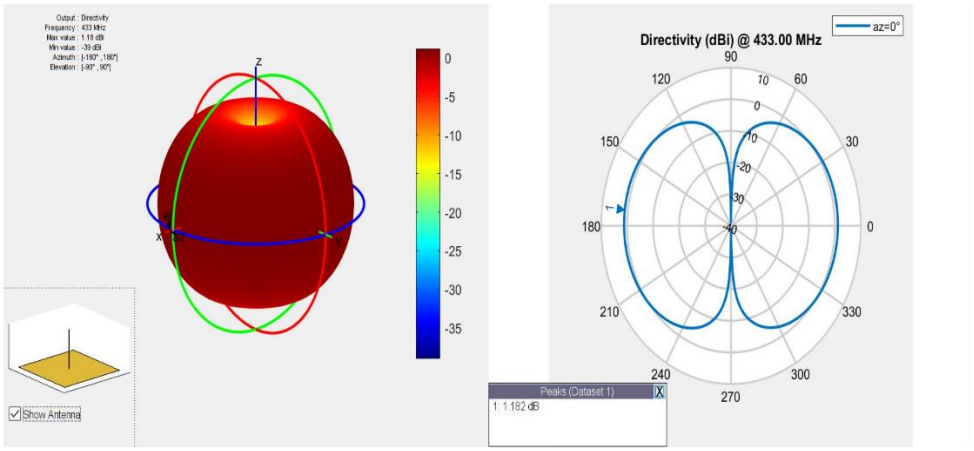


Figure III- 11 : Diagramme de rayonnement de l'antenne quart de pôle chargée en (3D et 2D)

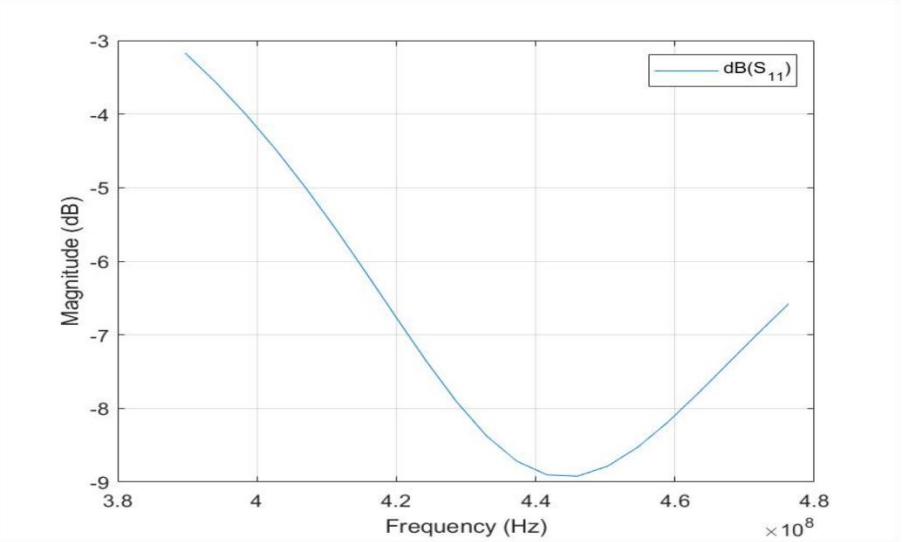


Figure III- 12 : S11 en fonction de la fréquence de l'antenne quarte de pôle chargée

III.2.6 L'interface SPI

SPI (Serial Peripheral Interface) est un protocole de données série synchrone utilisé par les microcontrôleurs pour communiquer avec un ou plusieurs périphériques. Par exemple, votre carte ESP32 communique avec un capteur supportant le SPI ou avec un autre microcontrôleur [68].

Pour la communication SPI, vous avez besoin de quatre lignes :

- MISO : Entrée Maître Sortie Esclave.
- MOSI : Sortie maître Entrée esclave.

- SCK : Horloge série.
- SS : Chip Select.

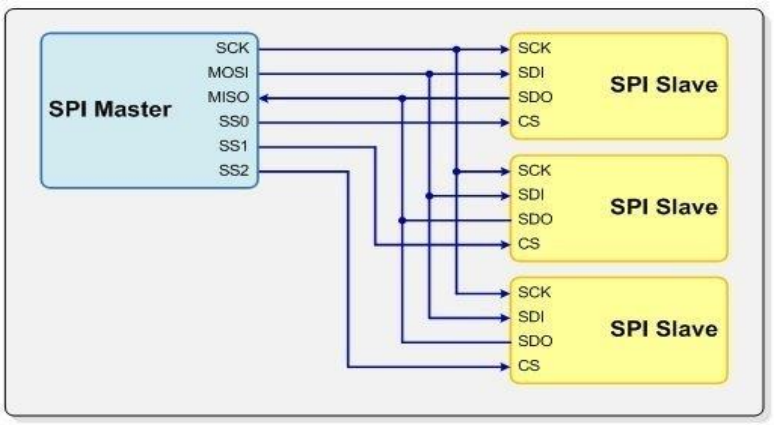


Figure III- 13 : L'interface communication SPI

III.2.7 L'interface I2C

L'interface I2C (Inter-Integrated Circuit) est un bus de communication série synchrone utilisé pour permettre la communication entre un microcontrôleur et plusieurs périphériques. Il est largement utilisé pour connecter des capteurs, des modules d'affichage OLED, des EEPROM et d'autres périphériques à un microcontrôleur [68].

L'interface I2C utilise deux lignes principales :

- La ligne de données SDA (Serial Data) : Cette ligne est utilisée pour la transmission des données entre le microcontrôleur et les périphériques connectés.
- La ligne d'horloge SCL (Serial Clock) : Cette ligne est utilisée pour synchroniser la transmission des données entre le microcontrôleur et les périphériques.

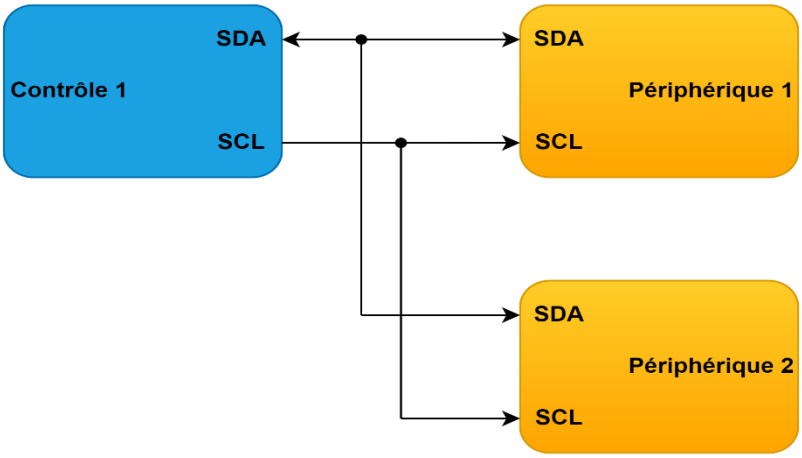


Figure III- 14 : L'interface de communication I2C

III.2.8 Écran OLED SSD1306

SSD1306 est un pilote CMOS OLED/PLED monopuce avec contrôleur pour l'émission de lumière organique/polymère système d'affichage graphique à matrice de points à diodes. Il se compose de 128 segments et 64 Commons. Ce circuit intègre est conçu pour le panneau OLED de type cathode commune [69].

Le SSD1306 intègre un contrôle de contraste, une RAM d'affichage et un oscillateur, ce qui réduit le nombre de composants externes et la consommation d'énergie. Il dispose d'un contrôle de la luminosité en 256 étapes. Les données/commandes sont envoyé depuis le MCU général via l'interface parallèle compatible série 6800/8000 sélectionnable par matériel, I2C ou interface périphérique série [69].



Figure III- 15 : Écran OLED

III.2.8.1 Caractéristiques

- Dimensions : 28 mm x 33 mm x 4 mm
- Matrice de points : 128 x 64
- Taille des pixels : 0,152 × 0,152 mm
- Pas des pixels : 0,175 × 0,175 mm
- Mode d'affichage : matrice passive
- Couleur d'affichage : Blanc
- Interface : I2C
- Consommation électrique : moins de 11 mA
- Taille : 0,96 pouce

III.2.9 Réalisation matérielle

La carte PCB du nœud qui contient les composantes précédentes. L'annexe A présente le schéma électronique de principe de ce composant assemblé sur le PCB.

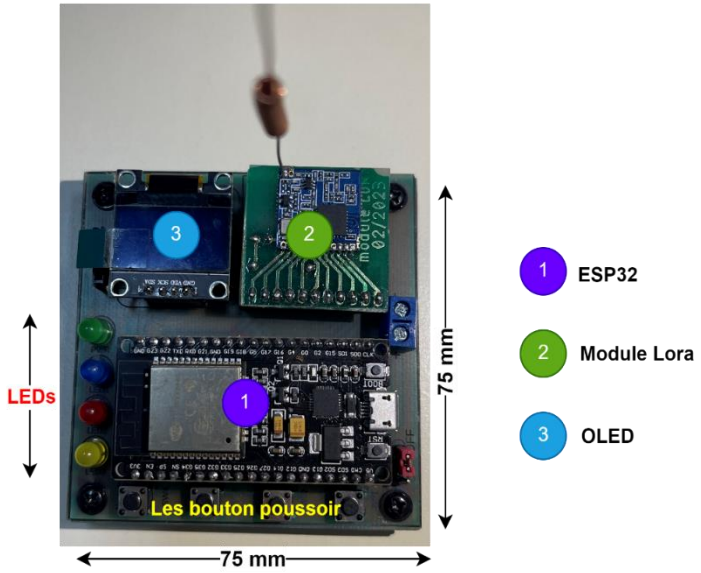


Figure III- 16 : La carte de noeud mobile

III.3 Logiciels et outils de programmation

III.3.1 Environnement de développement d'Arduino

IDE Arduino s'agit d'une application multiplateforme écrite avec des fonctions de C et C++. Il est utilisé pour écrire et télécharger des programmes sur des cartes compatibles Arduino. Le code source de l'IDE est publié sous la licence publique générale GNU, version 2. L'IDE Arduino prend en charge les langages C et C++ en utilisant des règles de structuration de code spéciales [70].

L'IDE Arduino permet :

- Édition de programme : L'IDE Arduino permet d'éditer des croquis (ou sketches) qui sont des programmes écrits en langage C++ avec des fonctionnalités spécifiques à Arduino.
- Compilation du programme : L'IDE Arduino compile le code C++ du croquis en langage "machine" adapté au microcontrôleur de la carte Arduino. La console fournit des informations sur la compilation en cours et affiche les éventuels messages d'erreur.

- Téléversement du programme : Une fois compilé, le programme peut être téléversé (ou uploadé) dans la mémoire de la carte Arduino. Cela se fait généralement via le port USB de l'ordinateur connecté à la carte Arduino.
- Communication avec la carte Arduino : La communication avec la carte Arduino via le terminal (ou moniteur série). Pendant le fonctionnement du programme en mémoire sur l'Arduino, il peut échanger des données avec l'ordinateur tant que la connexion est active (par exemple, via un câble USB).

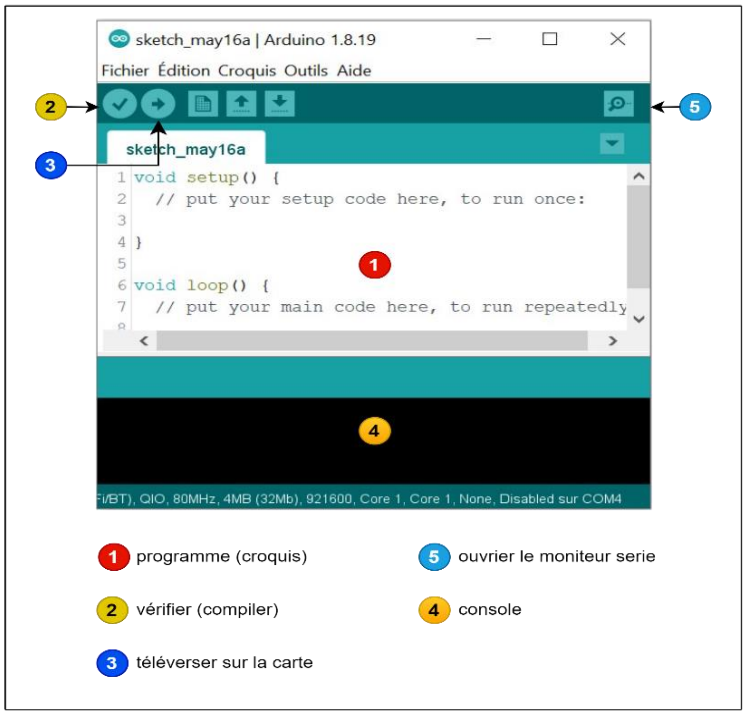


Figure III- 17 : L'interface Arduino IDE

III.3.1.1 Programmer ESP32 avec Arduino

Pour programmer l'ESP32 avec Arduino, vous pouvez suivre les étapes suivantes :

- Après avoir installé l'IDE Arduino, ouvrez-le et allez dans le menu "Fichier" puis sélectionnez "Préférences".
- Dans la boîte de dialogue des préférences, recherchez le champ "URL de gestionnaire de cartes supplémentaires" et ajoutez le lien suivant :

("http://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.json".)

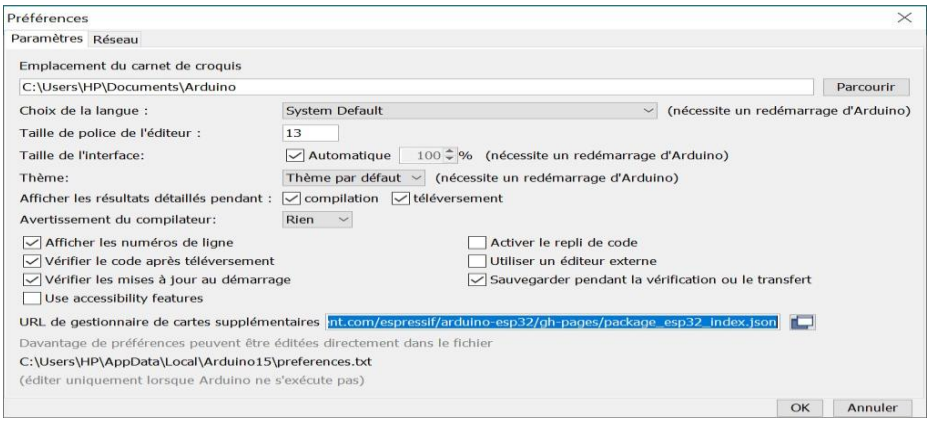


Figure III- 18 : La boite de dialogue préférence

- Cliquez sur le bouton "OK" pour fermer la boîte de dialogue des préférences.
- Dans le champ de recherche du Gestionnaire de cartes, tapez "ESP" pour filtrer les résultats.
- Recherchez "esp32" dans la liste des cartes disponibles et cliquez sur le bouton "Installer" pour télécharger les bibliothèques nécessaires.

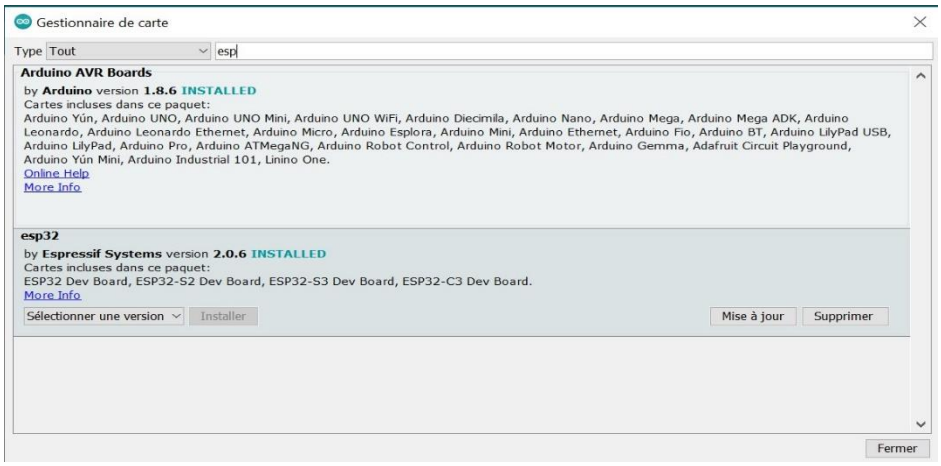


Figure III- 19 : Téléchargement du soft de programmation de l'Esp32

- Une fois le téléchargement terminé, retournez dans le menu "Outils" et sélectionnez "Type de carte", puis choisissez "ESP32 Arduino" dans la liste.

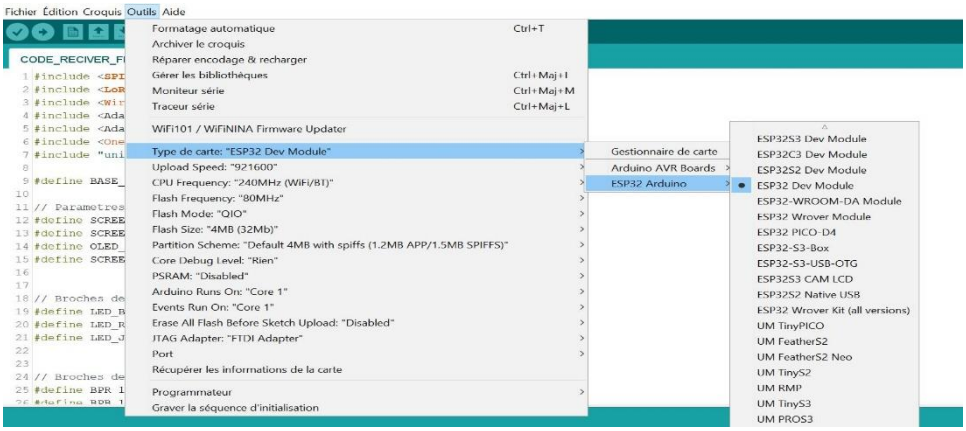


Figure III- 20 : Type de carte utilisé

- Dans le menu "Outils", sélectionnez le port COM correspondant à votre adaptateur ESP32 dans l'option "Port".
- Enfin, cliquez sur "Téléverser" pour compiler et télécharger votre programme sur le module ESP32.

III.3.1.2 Téléchargement des bibliothèques nécessaires (LoRa)

Pour télécharger la bibliothèque LoRa dans l'IDE Arduino, suivez les étapes suivantes :

- Accédez au menu "Croquis" (Sketch), puis sélectionnez "Inclure une bibliothèque" (Include Library).
- Une fenêtre appelée "Gestionnaire de bibliothèques" s'ouvrira.
- Dans la barre de recherche en haut à droite, tapez "LoRa" et appuyez sur Entrée.
- Sélectionnez la bibliothèque "LoRa" et cliquez sur "Installer".

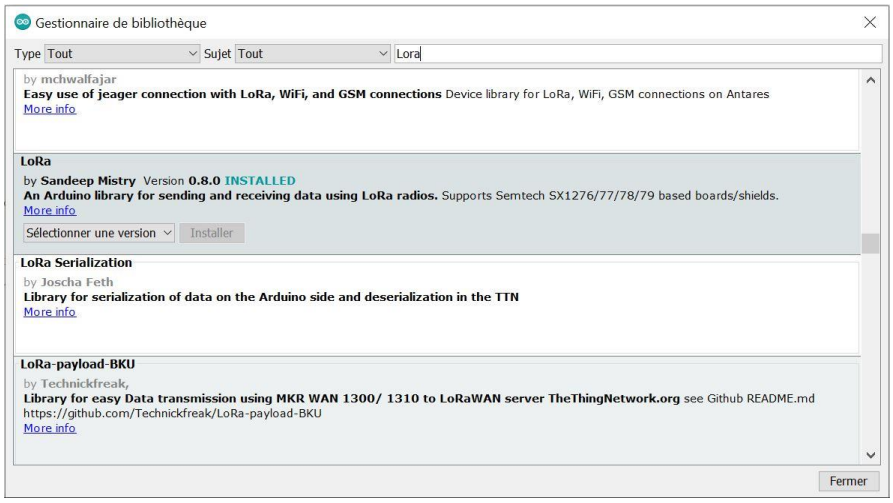


Figure III- 21 : Téléchargements des bibliothèques (LoRa)

III.3.2 Node-RED et serveur flowforge

III.3.2.1 Node-RED

III.3.2.2 Présentation

Node-RED est un outil de développement libre basé sur les flux pour l'intégration de périphériques IoT, d'API (Applications Programming Interfaces) et de services en ligne développés par IBM Emerging Technology. Node-RED est un outil gratuit basé sur JavaScript, construit sur la plate-forme Node.js, qui fournit un éditeur de flux basé sur un navigateur visuel. Le système contient des nœuds représentés par des icônes appropriées. Il peut fonctionner de deux façons : faire glisser, déposer et câbler des nœuds, ou importer du code JavaScript [71].

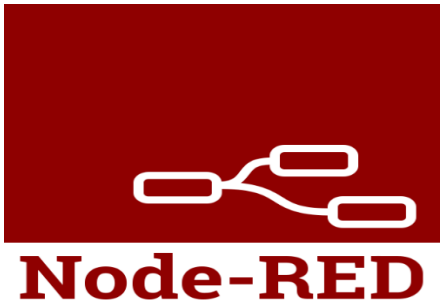


Figure III- 22 : Logo de Node -Red

Une installation standard de Node-RED propose 4 types de nœuds de base [72]:

- **Nœuds d'entrée** : entrée de messages via un nœud manuel (injecte), MQTT, http, etc.
- **Nœuds de sortie** : sortie des messages via les nœuds de débogage, MQTT, http et autres.
- **Nœuds de fonction** : permettant le traitement des messages.
- **Nœuds sociaux** : interaction avec les médias sociaux.

Il est possible de télécharger et d'installer un plus grand nombre de nœuds via npm, le registre du logiciel de gestion de packages JavaScript, à partir d'une vaste bibliothèque de contributions au projet Node-RED.

Un certain nombre de nœuds standard sont disponibles, tels que : inject , debug , mqtt in , function , mqtt out , json etc.



Figure III- 23 : L'Interface de Node-RED

III.3.2.3 Serveur flowforge

FlowForge est une plateforme qui vise à aider les développeurs Node-RED à fournir des applications de manière fiable, collaborative et sécurisée. En complément de l'environnement de développement intuitif et à faible code de Node-RED, FlowForge offre des fonctionnalités telles que le développement collaboratif, la gestion des déploiements à distance, la prise en charge des pipelines de livraison DevOps et la possibilité d'héberger des applications Node-RED. Cela permet aux développeurs de connecter facilement des périphériques matériels, des API et des services en ligne dans un environnement sécurisé. FlowForge se positionne ainsi comme une plateforme DevOps pour le développement et la livraison d'applications Node-RED [73].

Figure III- 24 : Logo flow forge

III.3.3 Le protocole MQTT

III.3.3.1 Définition

MQTT est un protocole de messagerie basé sur des normes, ou un ensemble de règles, utilisé pour la communication de machine à machine. Les capteurs intelligents, les objets portés sur soi (wearables) et les autres appareils de l'Internet des objets (IoT) doivent généralement

transmettre et recevoir des données sur un réseau aux ressources limitées et à la bande passante restreinte. Ces appareils IoT utilisent MQTT pour la transmission des données, car il est facile à implémenter et peut communiquer efficacement les données IoT. MQTT prend en charge la messagerie des appareils vers le cloud et du cloud vers l'appareil [74].

Le protocole MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) peut être utilisé avec différents brokers tels que Mosquitto, JoramMQ, ActiveMQ et RabbitMQ [75].

III.3.3.2 Mode de fonctionnement MQTT

MQTT est un protocole de publication et de souscription de message. Les clients ne communiquent pas directement entre eux, ils publient des messages sur un broker (appelé aussi courtier), les messages sont composés d'un contenu et d'un sujet (topic). Le broker garde en mémoire le dernier message pour chaque sujet. Les clients qui sont intéressés par les messages d'un sujet peuvent les récupérer en se connectant au broker. L'avantage de cette solution est qu'elle permet à plusieurs clients de communiquer même s'ils ne sont jamais connectés en même temps au broker [76].

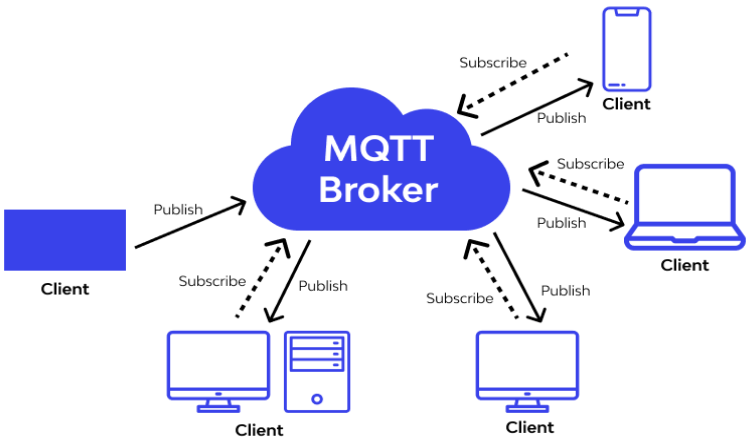


Figure III- 25 : Fonctionnement du protocole MQTT

III.3.3.3 Abonnements et Publications

Chaque message publié est nécessairement associé à un sujet, ce qui permet sa distribution aux abonnés. Les sujets peuvent être organisés en hiérarchie arborescente, ainsi les abonnements peuvent porter sur des motifs de filtrage.

La gestion des abonnements est simplifiée et se résume à trois commandes essentielles :

- **SUBSCRIBE** : Permet à un client de s'abonner à un topic, une fois abonné il recevra par la suite toutes les publications concernant ce sujet. Un abonnement définit également un

niveau de qualité de service. La bonne réception de cette commande est confirmée par le broker par un SUBACK portant le même identifiant de paquet.

- **UNSUBSCRIBE :** Donne la possibilité d'annuler un abonnement, et ainsi ne plus recevoir les publications ultérieures. La bonne réception de cette commande est confirmée par le broker par un UNSUBACK portant le même identifiant de paquet.
- **PUBLISH :** Initié par un client, permet de publier un message qui sera transmis par le broker aux abonnés éventuels. La même commande sera envoyée par le broker aux abonnés pour délivrer le message Si la qualité de service requise est supérieure à zéro, des messages seront échangés pour confirmer la prise en charge de la publication [77].

III.4 Fonctionnement du système de collecte

III.4.1 Programmation des nœuds

III.4.1.1 Partie Setup

La figure suivante présente l'organigramme de la partie (setup) pour l'initialisation des périphériques.

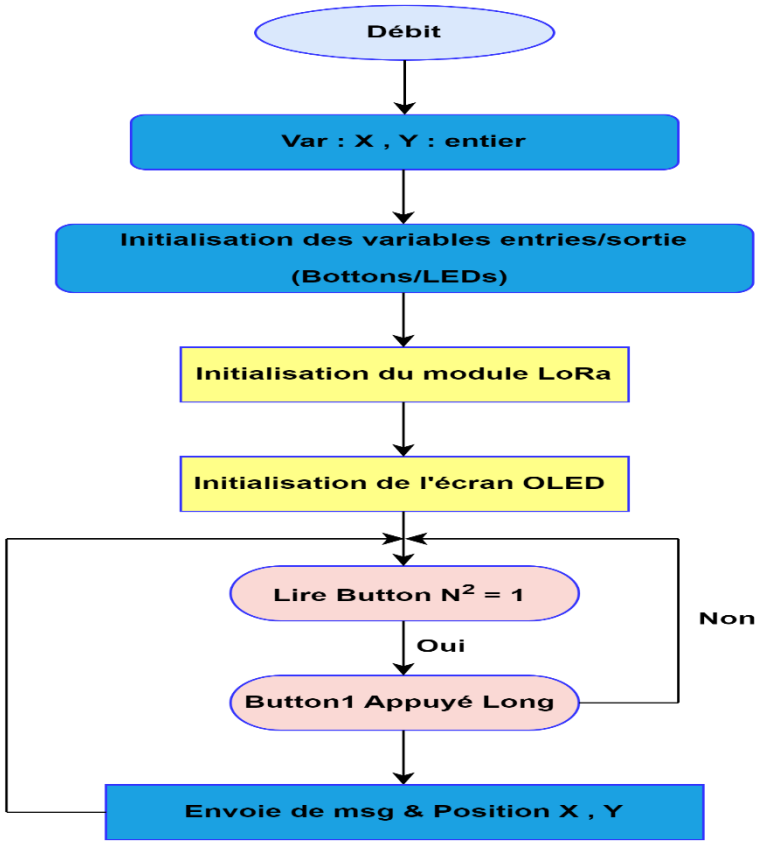


Figure III- 26 : L'organigramme simplifie de programme de nœud émetteur mobile

III.4.1.2 Partie Loop

Dans la partie Loop (boucle principale), les deux figures ci-dessous présentent l'utilisation de machines à états pour programmer les nœuds afin permettre la communication entre eux. Les nœuds ont été programmés en langage C sur l'IDE Arduino, en utilisant la structure Switch-case pour l'implémentation des machines à états

✓ **Nœud mobile :**

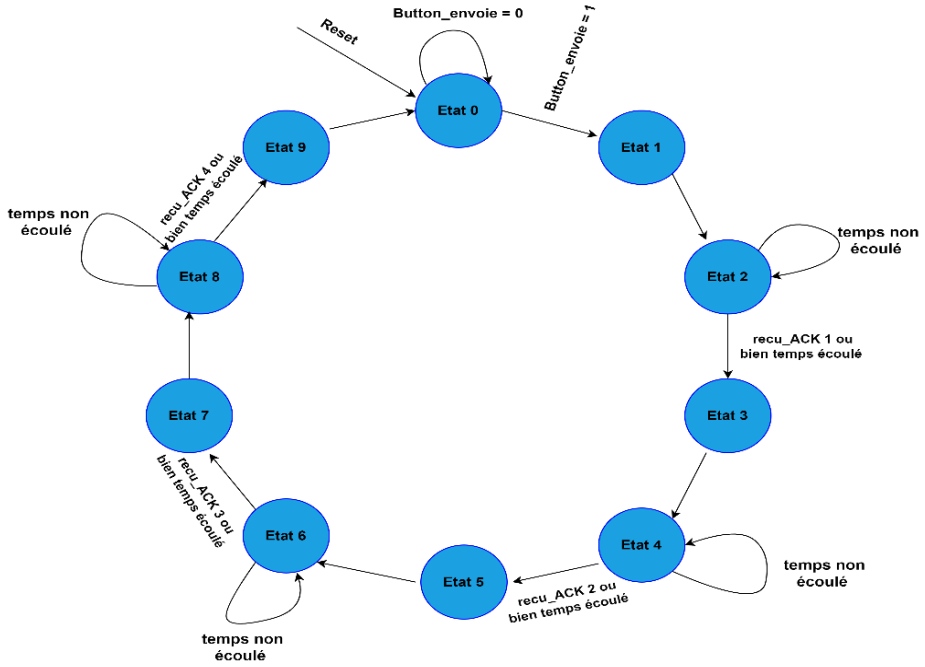


Figure III- 27 : Machine à états de nœuds mobiles

À l'initialisation (RESET) la machine à état débute à l'**État 0**

- **État 0 :** attendre l'appuie sur le bouton

Tanque le bouton égale 0 le nœud mise en attente c'est le bouton est appuies alles a l'état 1

- **État 1 :** Envoi du paque 1

Lorsque le bouton est appuyé (Button = 1), le nœud émet le signal vers le nœud 1

- **État 2 :** attente de passage le temps spécifié

Le nœud est en attente pour recevoir l'ACK 1. Tant que le temps spécifié n'est pas écoulé et que l'ACK pour ce paquet n'est pas reçu, le nœud reste dans cet état. Une fois que le temps spécifié est écoulé le nœud passe à l'état suivant.

Ce processus se répète pour les **État 4, 5**, et ainsi de suite jusqu'à **État 9**, et ensuite il passe directement à **État 0** pour continuer la transmission de nouveau paquets.

✓ **Nœud fixe :**

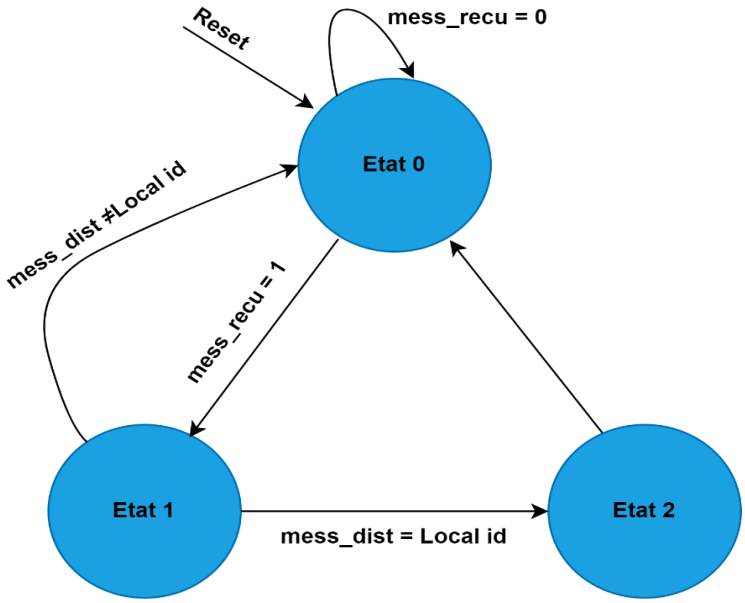


Figure III- 28 : Machine à états de nœuds fixe

À l'initialisation (RESET) la machine à état débute à l'**État 0**

- **État 0 :** Attente la réception du message

Le nœud fixe est en attente de recevoir un message provenant d'un nœud mobile.

- **État 1 :** Lire du message et vérification de l'identifiant

Le nœud fixe lit le message reçu et vérifie si le message lui est adressé en vérifiant son identifiant. Si le message ne lui ait pas destiné, le nœud fixe retourne à l'état 0.

- **État 2 :** Envoi d'un accusé de réception (ACK)

Le nœud fixe envoie un accusé de réception (ACK) au nœud mobile pour confirmer la réception du message. Après l'envoi de l'ACK, le nœud fixe passe directement à l'étape suivante (état 0) pour continuer à attendre la réception de nouveaux messages.

III.4.2 Positionnement des nœuds

Pour le positionnement des quatre nœuds sur la carte, nous avons utilisé les coordonnées connues pour assurer un positionnement précis. Voici les coordonnées des quatre nœuds :

Tableau III- 2 : Positionnement des nœuds

Les nœuds	Les coordonnées	
	X	Y
Base 1	7	2
Base 2	34	14
Base 3	6	26
Base 4	28	14

De plus, nous avons capturé des images à l'aide d'un téléphone pour documenter le positionnement des nœuds. Ces images fournissent une référence visuelle de l'emplacement des nœuds sur la carte.



Figure III- 29 : l'emplacement des nœuds

III.4.3 Collecte de données

Dans notre projet de collecte de données pour le système de localisation sur le campus universitaire d'Ouzera, nous avons utilisé une carte du campus avec des dimensions de 360 mètres sur 360 mètres. Pour tracer la carte nous avons utilisé le logiciel QGIS est ce que l'on appelle communément un logiciel de SIG qui signifie Système d'Information Géographique. Cela correspond à des logiciels conçus pour recueillir, traiter, analyser, gérer et présenter différents types de données géographiques et spatiales. Nous avons installé quatre stations de réception fixes à des emplacements stratégiques sur le campus.

Pour réaliser la collecte de données, nous avons utilisé un nœud mobile qui émettait des signaux à des distances connues à partir de différentes positions sur le campus universitaire d'Ouzera. Les stations de réception installées sur le campus ont enregistré la puissance du signal

reçu (RSSI), ainsi que d'autres paramètres tels que les coordonnées (x, y) de la position et le rapport signal sur bruit (SNR).

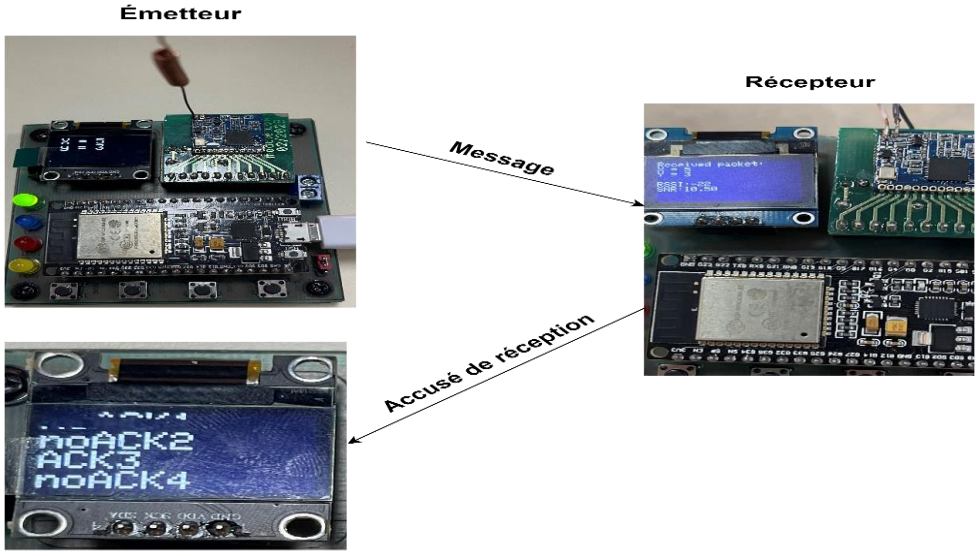


Figure III- 30 : Protocole de communication du nœud mobile avec une base station

Les données collectées, comprenant les mesures de puissance du signal RSSI, les coordonnées (x, y) et le rapport signal sur bruit (SNR), ont été enregistrées dans un serveur MQTT. Cette approche de stockage des données nous a permis de les stocker de manière organisée et de les gérer facilement pour une utilisation ultérieure.

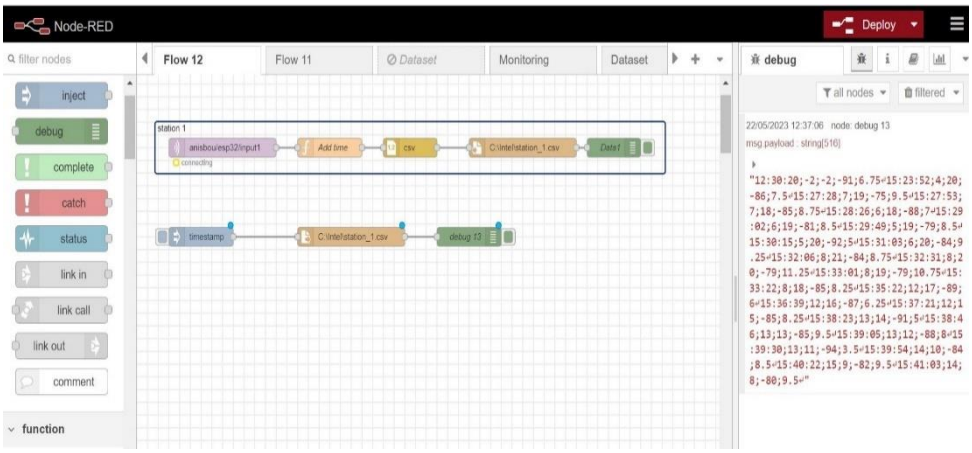


Figure III- 31 : les données registrent sur Node Red

Les nœuds de Node-RED utilisés dans la figure précédente sont les suivants :

- **MQTT In** : Recevoir les messages MQTT contenant les données de position (RSSI, SNR et X, Y) provenant d'autres nœuds.

- **Fichier CSV :** Manipuler les fichiers CSV contenant les données de position, en permettant la lecture et l'écriture des données pour faciliter le stockage et la gestion des informations de position.
- **Write file :** Écrire les données de position dans un fichier spécifié, permettant de stocker les informations de position dans un fichier dédié.
- **Debug :** Ce nœud est utilisé pour afficher les messages de débogage dans la console de sortie de Node-RED, en vérifiant le flux de données et les valeurs des variables associées aux informations de position.

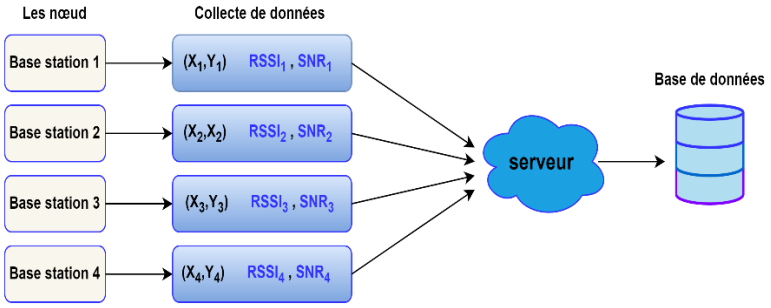


Figure III- 32 : Les données collectées

La collecte de données nous permettra d'analyser et de traiter les mesures RSSI pour développer un algorithme de localisation précis sur le campus universitaire d'Ouzera. Grâce à ces données, nous pourrons estimer la position des objets mobiles avec une précision et une fiabilité améliorée.

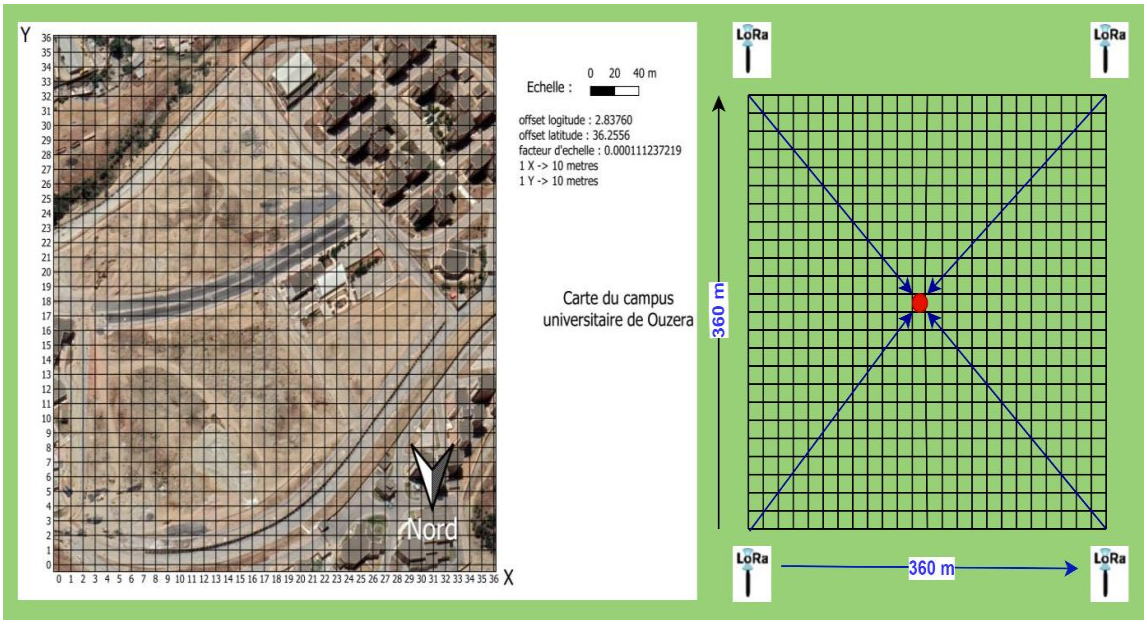


Figure III- 33 : La carte de campus universitaire d'Ouzera

III.5 Développement du système de localisation intelligent

Le système de localisation intelligent utilise deux méthodes basées sur des réseaux de neurones pour estimer la position des objets. Les données collectées par les nœuds fixes incluent les coordonnées (x, y) ainsi que les mesures de RSSI (Received Signal Strength Indicator).

Ces données sont transmises à un serveur MQTT pour être enregistrées.

1- Estimation de la position à partir des données collectées par les nœuds fixes

- Un réseau de neurones analyse les données et estime la position de l'objet en se basant sur les mesures de RSSI.
- Le réseau de neurones est entraîné à partir de données d'entraînement pour améliorer la précision des estimations de position.

2- Estimation de la distance par la puissance du signal RSSI et trilatération

- La station de base utilise un réseau de neurones pour estimer la distance à partir des mesures de RSSI reçues des nœuds.
- Ensuite, la technique de trilatération est appliquée en utilisant les distances estimées pour calculer la position exacte des nœuds.

Après avoir comparé les résultats des deux méthodes, nous avons pu déterminer celle qui offre la meilleure précision et la plus grande fiabilité pour notre système de localisation intelligent.

III.5.1 Analyse des données

La collecte de données est essentielle dans l'analyse des systèmes sans fil, et il est important de les analyser pour en extraire des informations utiles. Dans notre étude, nous avons utilisé deux méthodes distinctes pour exploiter les données collectées, qui sont les suivantes :

1. La première méthode utilise un nuage de points pour représenter la RSSI en fonction de la distance. Cette représentation graphique permet de visualiser la relation entre la puissance du signal reçu et la distance par rapport à l'émetteur. En traçant les points de RSSI sur un graphique en fonction de la distance, nous pouvons observer comment la puissance du signal varie avec la distance. Cela permet d'identifier les zones où le signal est fort et les zones où le signal est faible. Cette méthode est utile pour comprendre la propagation du signal et l'atténuation en fonction de la distance.

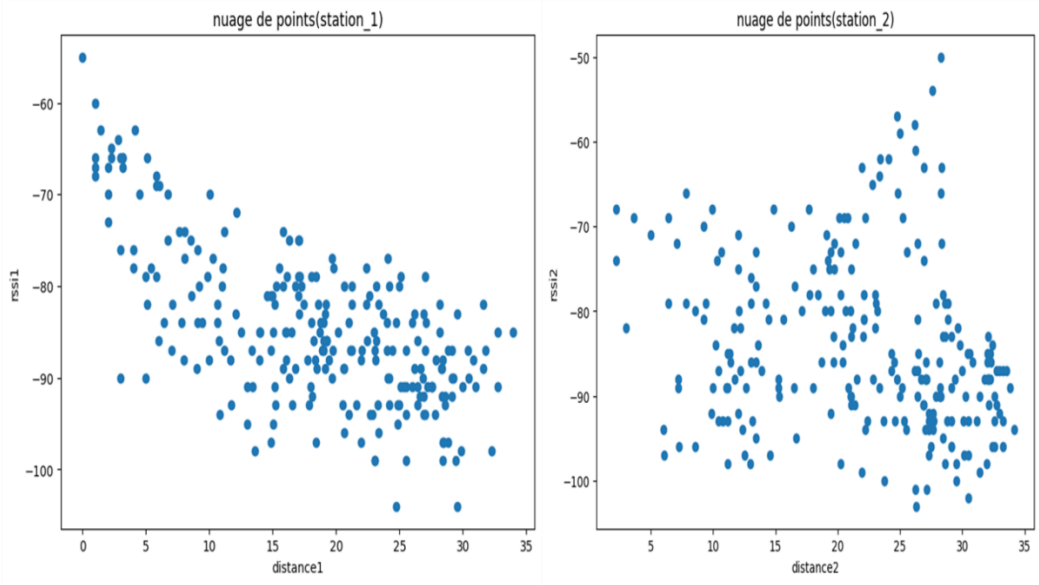


Figure III- 34 : Nuage de points de base station 1 et 2

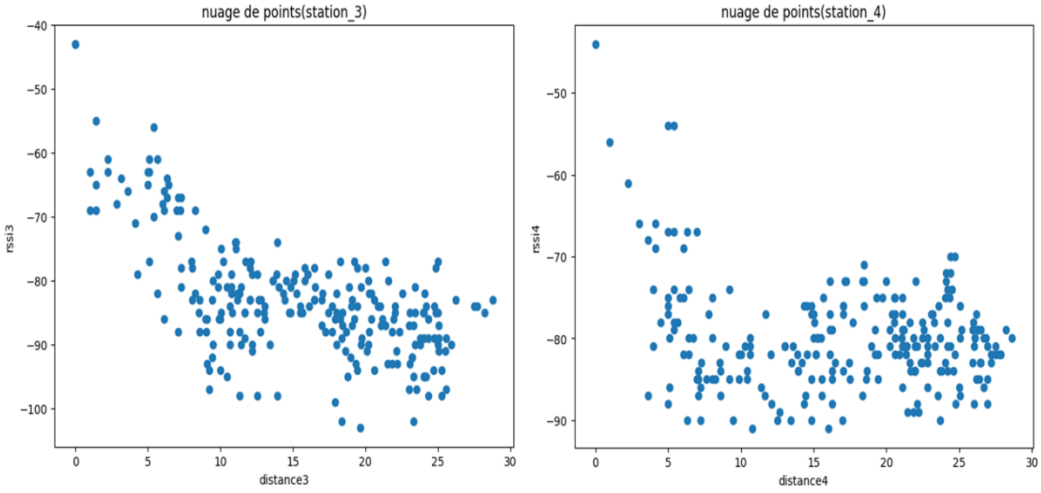


Figure III- 35 : Nuage de points de base station 3 et 4

2. La deuxième méthode utilise une heatmap de couleur pour représenter la RSSI en fonction de la position sur le campus universitaire d'Ouzera. Cette approche cartographie les variations de la puissance du signal dans différentes zones du campus. Les couleurs vives indiquent un signal fort, tandis que les couleurs plus sombres indiquent un signal faible. En utilisant cette représentation visuelle, il est possible d'identifier rapidement les zones où le signal est fort et les zones où le signal est faible sur le campus. Cette méthode permet une compréhension visuelle immédiate de la qualité du signal sans fil dans différentes zones.

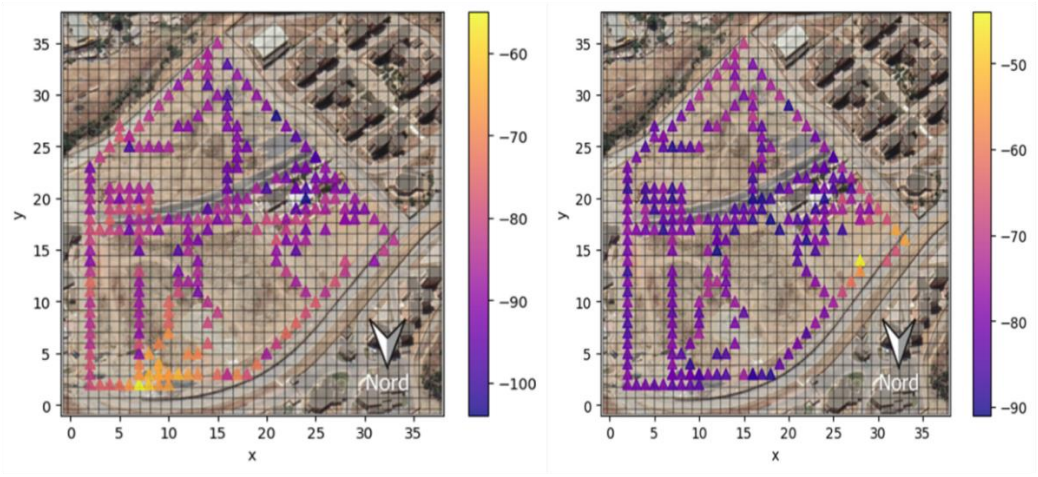


Figure III- 36 : Heatmap de la base station 1 et 2

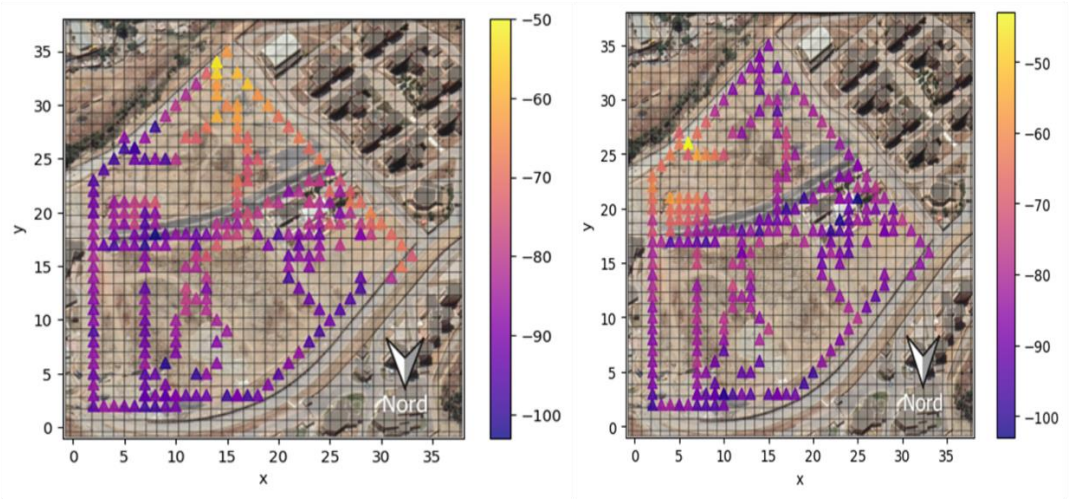


Figure III- 37 : Heatmap de la base station 3 et 4

Les deux méthodes d'analyse des données dans les systèmes sans fil (nuage de points et heatmap) fournissent des informations précieuses sur la puissance du signal. Elles permettent de prendre des décisions éclairées pour optimiser le réseau, placer les dispositifs de communication et améliorer la couverture dans les zones présentant des problèmes de signal.

III.5.2 Choix de l'algorithme L'AI de localisation

Après la collecte des données, vous avez choisi d'utiliser deux méthodes basées sur l'intelligence artificielle pour la localisation :

Méthode 1 : Utilisation d'un modèle ANN pour estimer la distance à partir des informations RSSI, suivi de l'utilisation de la méthode de multilatération pour la localisation. Dans cette méthode, le modèle ANN est entraînée à prédire la distance

entre les nœuds fixes et mobiles en fonction des valeurs RSSI. Une fois que les distances sont estimées, la méthode de multilatération est utilisée pour calculer la position du nœud mobile en utilisant les distances estimées à partir de plusieurs nœuds fixes.

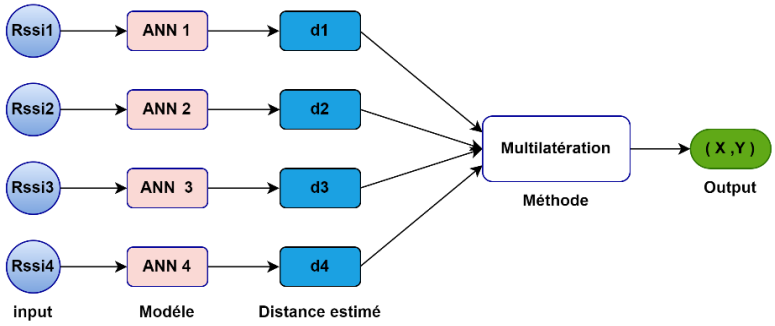


Figure III- 38 : Modèle ANN pour Méthode 1

Méthode 2 : Utilisation d'un modèle ANN (Artificiel Neural Network) pour estimer la position exacte à partir des informations RSSI. Dans cette méthode, les valeurs RSSI sont utilisées comme entrée pour le modèle ANN, qui est entraîné à prédire les coordonnées correspondantes du nœud mobile. Le modèle ANN peut capturer les relations complexes entre les valeurs RSSI et les positions réelles, permettant ainsi d'estimer la position exacte du nœud mobile.

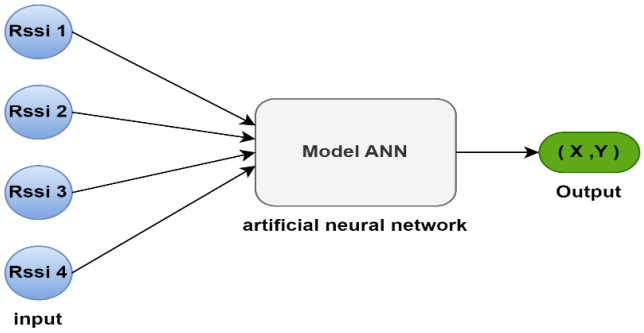


Figure III- 39 : Modèle ANN pour Méthode 2

III.5.3 Estimation des coordonnées (*x*, *y*)

Dans le développement du système de localisation intelligent, nous utilisons un réseau de neurones pour estimer les coordonnées (x, y) d'un nœud mobile à partir des données de RSSI. Les étapes principales sont :

- Préparation des données : Importation des paquets, lecture et conversion des données de RSSI, et division des données en ensembles d'entraînement et de validation.
- Construction et entraînement du modèle de réseau de neurones : Construction de l'architecture du modèle en spécifiant le nombre de couches et les fonctions d'activation, configuration de l'optimiseur Adam et de la fonction de perte MAE, et entraînement du modèle en ajustant les poids par rétropropagation du gradient.
- Affichage des résultats d'entraînement : Visualisation de la perte d'entraînement au fil des époques pour évaluer la convergence du modèle, ainsi que la perte de validation pour évaluer sa capacité à généraliser aux nouvelles données.

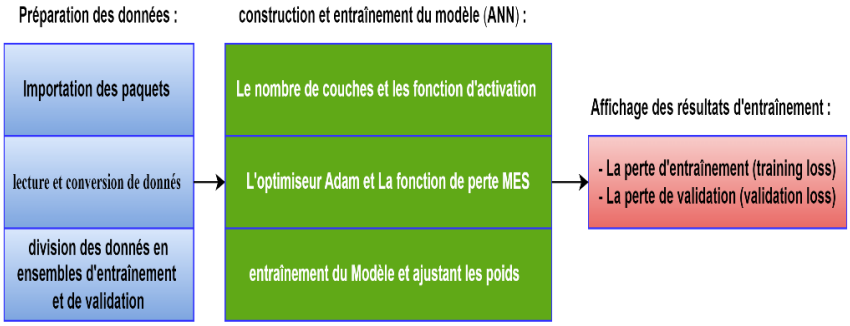


Figure III- 40 : Le diagramme de code source pour le modèle prédictif de coordonnées

III.5.4 Préparation des données

III.5.4.1 Importation des bibliothèques

L'importation des bibliothèques nécessaires pour le modèle de prévision des coordonnées comprend les éléments suivants :

- "pandas" pour la manipulation de données.
- "numpy" pour les calculs numériques.
- "matplotlib" pour la visualisation des données.
- "tensorflow" pour l'apprentissage automatique.
- "sklearn" pour la division des données en ensembles d'entraînement et de test.

```
# importer les librairies
import os
import numpy as np
import pandas as pd
import tensorflow as tf
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.model_selection import train_test_split
from tensorflow import keras
from tensorflow.keras import layers
```

Figure III- 41 : Importation des bibliothèques nécessaires

III.5.4.2 Chargement de données depuis un fichier Excel avec Pandas

Pour charger des données à partir d'un fichier Excel en utilisant la bibliothèque Pandas, vous pouvez utiliser la fonction "read_excel" :

```
# Load dataset
Data = pd.read_excel('/content/drive/MyDrive/datasetcomplete.xlsx')
Data.head()
```

	x	y	rssi1	rssi2	rssi3	rssi4
0	6	26	-87	-102	-43	-87
1	5	27	-79	-88	-69	-83
2	7	27	-80	-87	-65	-82
3	8	28	-84	-100	-68	-81
4	9	29	-84	-83	-79	-78

Figure III- 42 : Chargement de base donnée

III.5.4.3 Traitements de données pour le modèle de réseau de neurones

Dans le modèle de réseau de neurones, les traitements de données se résument comme suit :

- **Définition des entrées et des sorties :** Les données sont préparées en spécifiant les entrées et les sorties du modèle. Dans l'exemple présenté, les entrées sont les valeurs RSSI (RSSI1, RSSI2, RSSI3 et RSSI4) et les sorties sont les coordonnées (X, Y) des nœuds mobiles.
- **Mélange des données :** Mélange aléatoire des données pour éviter les biais liés à l'ordre de présentation et garantir une représentation équilibrée des données lors de l'entraînement.

- **Division des données :** Diviser les données en ensembles d'entraînement, de validation et de test pour évaluer la performance du modèle et détecter sur l'ajustement.

```
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.utils import shuffle
# Charger les données
rssi = Data.iloc[:, -4:]
xy = Data.iloc[:, :-4]
# Mélanger les données
rssi, xy = shuffle(rssi, xy, random_state=0)
# Diviser les données en ensembles d'entraînement et de test
rssi_train, rssi_test, xy_train, xy_test = train_test_split(rssi, xy, train_size=0.8, random_state=0)
# Convertir en tableaux numpy
rssi_train = rssi_train.to_numpy()
rssi_test = rssi_test.to_numpy()
# Redimensionner les tableaux
rssi_train = rssi_train.reshape(-1, 4)
rssi_test = rssi_test.reshape(-1, 4)
```

Figure III- 43 : Traitements de données pour le modèle de réseau de neurones

III.5.4.4 Construction et l'entraînement du model

Dans la construction et l'entraînement du modèle :

- Un modèle séquentiel est créé avec trois couches entièrement connectées. La fonction d'activation ReLU est utilisée dans les couches cachées pour introduire de la non-linéarité dans le modèle.
- Le modèle est compilé en utilisant la fonction de perte "MAE" (Erreur Moyenne Absolue), qui mesure l'écart entre les valeurs prédites et les valeurs réelles de la sortie. L'optimiseur Adam est utilisé pour minimiser cette fonction de perte, avec un taux d'apprentissage par défaut de 0,001. Cela permettra d'ajuster les poids du modèle de manière appropriée pendant l'entraînement.

```
# Construction du modèle
model = Sequential()
model.add(Dense(64, activation='relu', input_shape=(4,)))
model.add(Dense(32, activation='relu'))
model.add(Dense(2))
model.summary()
# Compilation du modèle
model.compile(loss='mae', optimizer=Adam(learning_rate=0.001))
# Entraînement du modèle
model.fit(rssi_train, xy_train, validation_data=(rssi_test, xy_test), epochs=50, batch_size=32)
```

```
Model: "sequential_5"
_________________________________________________________________
 Layer (type)                Output Shape              Param #
=================================================================
 dense_15 (Dense)            (None, 64)                320

 dense_16 (Dense)            (None, 32)                2080

 dense_17 (Dense)            (None, 2)                 66

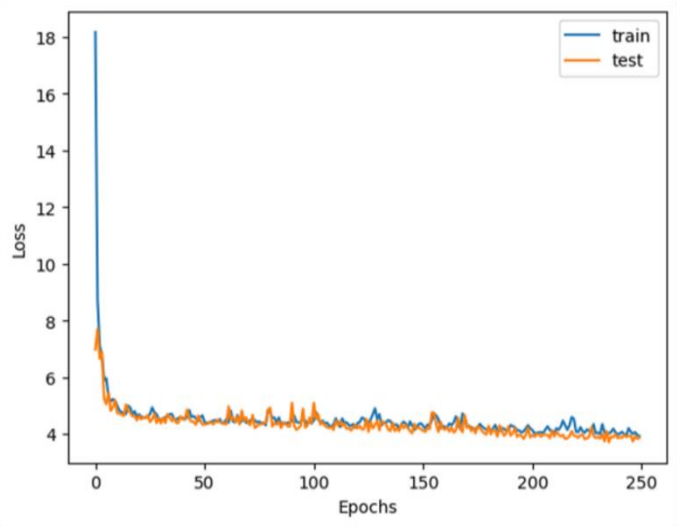
=================================================================
Total params: 2,466
Trainable params: 2,466
Non-trainable params: 0
```

Figure III- 44 : Construction d'un modèle

III.5.4.5 Affichage des résultats d'entraînement

Dans le compilateur du modèle ANN utilisé pour estimer la position exacte à partir des informations RSSI, la fonction de perte utilisée est l'erreur absolue moyenne (MAE), donc la "perte" et val_loss enregistrées dans l'historique sont les valeurs de perte calculées par le MAE. La figure III-42 représente le graphe de la variation des pertes en fonction des époques.

```
# Affichage du graphe de la perte d'entraînement et de validation
import matplotlib.pyplot as plt
plt.plot(history.history['loss'], label='train')
plt.plot(history.history['val_loss'], label='test')
plt.ylabel('Loss')
plt.xlabel('Epochs')
plt.legend(loc='upper right')
plt.show()
```




```
2/2 [==============================] - 0s 8ms/step - loss: 4.0491
test loss :  4.049126148223877
```

Figure III- 45 : Résultats de l'entraînement et de test.

Dans l'autre modèle, la fonction de perte utilisée est également l'erreur absolue moyenne (MAE). Cependant, la différence réside dans l'approche de localisation utilisée. Ce modèle utilise un modèle ANN pour estimer la distance à partir des informations RSSI. La figure III-43 et III-44 représente les graphes de la variation des pertes en fonction des époques.

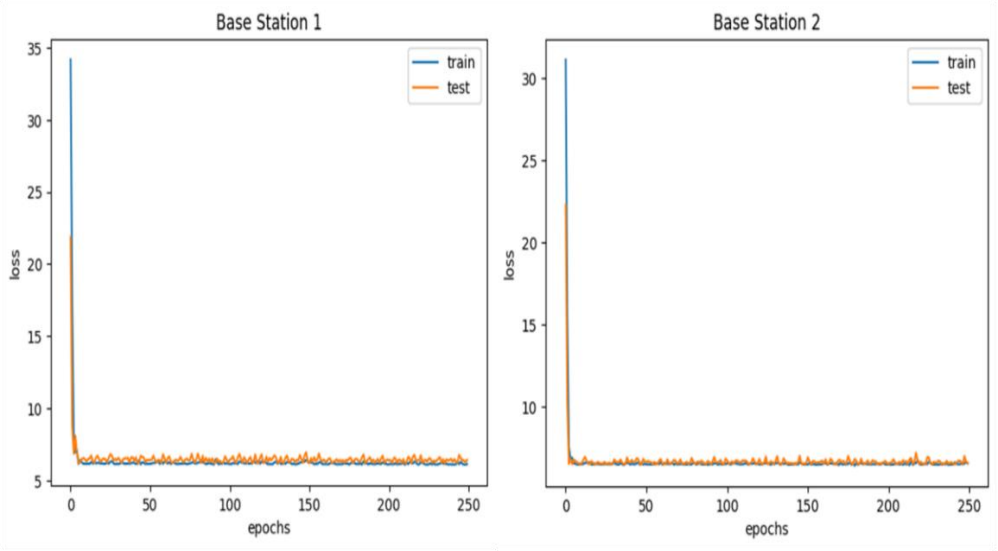


Figure 0- 43 : Résultats de l'entraînement et de test 1 et 2

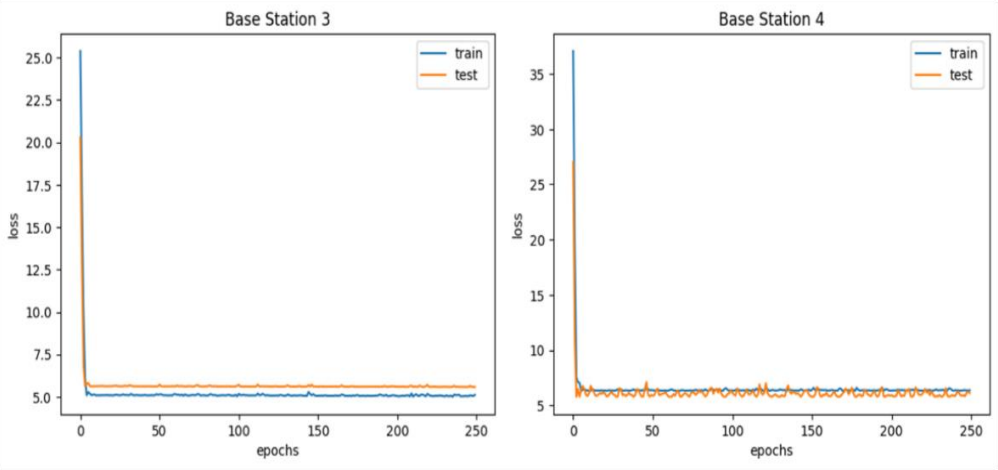


Figure 0- 44 : Résultats de l'entraînement et de test de base 3 et 4

Après l'entraînement de ce modèle, les erreurs absolues ont été résumées dans un tableau :

Tableau III- 3 : L'erreur moyenne absolue

Les bases station	Erreur moyenne absolue
Base station 1	6.150
Base station 2	6.500
Base station 3	5.589
Base station 4	6.027

La précision du modèle basé sur la multilateration pour estimer la position dépend de la précision des données estimées par les quatre modèles de réseaux de neurones. Ces modèles sont spécifiquement entraînés pour prédire la distance entre les nœuds mobiles et les nœuds fixes en se basant sur les informations RSSI.

III.5.5 Test expérimentale et résultats

Dans les tests expérimentaux réalisés pour valider la précision des deux méthodes de localisation basées sur les modèles ANN, l'objectif était de déterminer le modèle le plus efficace qui serait implémenté ultérieurement dans la station de base.

La figure III-45 suivante montre la distribution des données de position réelle et des positions estimées par les modèles ANN utilisés pour l'estimation de position, ainsi que le modèle ANN utilisé pour l'estimation de distance à partir des informations RSSI suivies d'une méthode multilatérale de localisation. Cette visualisation aide à comprendre la répartition des erreurs de positionnement et d'identifier la méthode la plus efficace entre les deux.

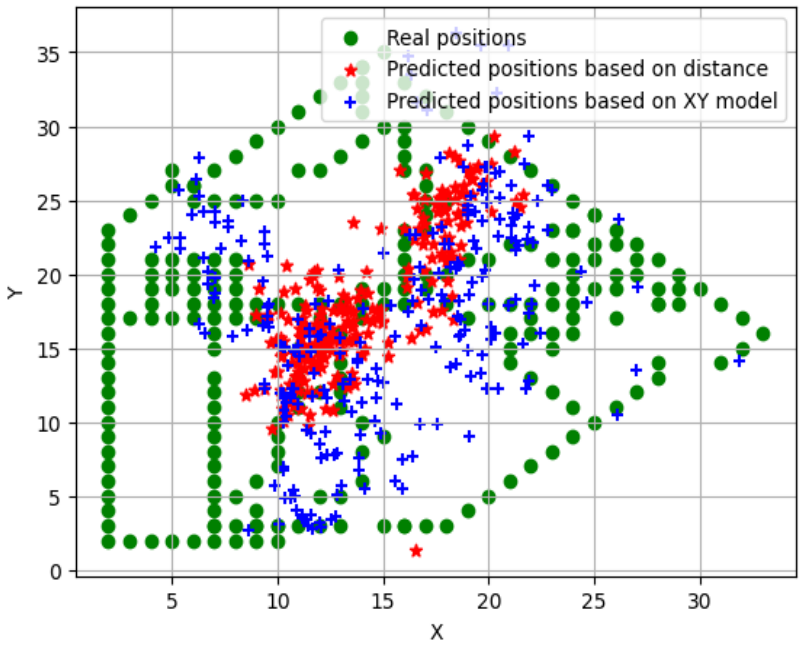


Figure 0- 45 : résultats de Test

D'après l'analyse de la distribution des données de position réelle et des positions estimées, il semble que la méthode d'estimation de position directe (méthode 2) soit plus performante que l'autre méthode.

Dans le but d'obtenir une analyse plus approfondie des performances des modèles, une deuxième comparaison a été réalisée en calculant la distance euclidienne entre les coordonnées réelles et les coordonnées prédites par les deux modèles. Les résultats de cette comparaison ont été enregistrés dans un tableau disponible en Annexe B.

III.6 Conclusion

Dans notre projet de localisation basé sur des nœuds sans fil, la qualité de cette application dépend de la valeur du RSSI mesurée par quatre nœuds, ainsi que des performances des deux modèles utilisés pour déterminer la position. Après avoir comparé les performances des modèles, nous avons constaté les avantages de l'utilisation de nœuds sans fil dans divers environnements. Le positionnement précis des stations est essentiel pour obtenir une localisation précise. Ces résultats peuvent être utiles pour le développement futur d'applications de localisation sans fil.

Conclusion générale

La technologie de communication sans fil avec Lora est devenue de plus en plus populaire et a attiré l'attention des chercheurs en raison de sa simplicité, de son efficacité, sa capacité de communication longue distance et sa faible consommation d'énergie.

La localisation en extérieur présente des défis liés aux obstacles physiques, aux interférences électromagnétiques et aux réflexions de signal, qui peuvent compromettre la précision. De plus, les mesures de RSSI sont sujettes aux variations environnementales, augmentant ainsi la complexité de la localisation en extérieur.

Nous avons également eu l'occasion de manipuler des logiciels utilisés pour la configuration, et l'interface de programmation comme Arduino IDE, qui permet non seulement la conception et l'implémentation avec Arduino, mais également avec la plateforme ESP32 pour le développement d'applications.

En outre, notre projet nous a offert l'opportunité de découvrir le domaine de l'intelligence artificielle en développant et en implémentant un réseau de neurones pour l'estimation de position sur la plateforme ESP32.

Les résultats expérimentaux ont montré que le modèle d'estimation des coordonnées basé sur les réseaux de neurones donne des résultats estimes, avec une précision moyenne de 40 mètres dans une espace de 360m mètres carrés.

Les perspectives suggérées pour notre travail futur sont les suivantes :

- Continuer à explorer de nouvelles techniques d'intelligence artificielle pour localiser et estimer les coordonnées.
- Pour améliorer la précision de la localisation, on peut ajouter plusieurs nœuds de base station. L'augmentation du nombre de ces nœuds permet d'obtenir une meilleure couverture et des mesures plus précises, ce qui se traduit par une amélioration globale de la précision de la localisation.
- Utiliser un système de localisation hybride, telles que la combinaison de la méthode TOA avec le RSSI, ce qui permet d'améliorer la précision de la localisation.
- Pour réduire les variations et les fluctuations du signal, on suggère de faire un moyennage des mesures RSSI pour obtenir une localisation plus précise et stable.

Bibliographie

Bibliographie

[1] S.-H. Yang Principles, « Signals and Communication Technology Wireless Sensor Networks ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.springer.com/series/4748

[2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, et E. Cayirci, « Wireless sensor networks: A survey », *Computer Networks*, vol. 38, n° 4, p. 393-422, mars 2002, doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.

[3] Guiloufi Benfradj Awatef, « Contributions à l'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil », Université de Sfax, Sfax, 2014. doi: 10.13140/RG.2.2.25510.47688.

[4] HAMID Mouna et ROUAM Rania, « Optimisation de déploiement et de localisation de cible dans les réseaux de capteurs sans fils, Mémoire de fin d'étude », UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ, BOUIRA , 2018.

[5] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, et R. Verdone, « An overview on wireless sensor networks technology and evolution », *Sensors*, vol. 9, n° 9. p. 6869-6896, septembre 2009. doi: 10.3390/s90906869.

[6] F Akyildiz, W Su, Y Sankarasubramaniam, et E Cayirci, « A Survey on Sensor Networks », Grorgia, août 2002.

[7] B. Kamal, « conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs ». juin 2009.

[8] V. Kanakaris, « energy aware routing protocols in ad hoc wireless networks ».

[9] B. A. Begum et S. V. Nandury, « Data aggregation protocols for WSN and IoT applications – A comprehensive survey », *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 35, n° 2, p. 651-681, févr. 2023, doi: 10.1016/j.jksuci.2023.01.008.

[10] Muhammed R Ahmed, Xu Huang, Sharma Dharmandra, et Cui Hongyan, « wireless-sensor-network-characteristics-and-architectures », *Information and Communication Engineering* , 2012.

[11] A Prasina et M Thangaraja, « Interoperability of Wireless Mesh and Wi -Fi network using FPGA for 4G Solutions. », Chennai: IEEE, mai 2011.

[12] C. A. Nwabueze, M. Eng, M. Silas, et A. Akaneme, « wireless fidelity (wi-fi) broadband network technology: an overview with other broadband wireless networks », *Tech,ology in Human Services*, juin 2009.

[13] S. Kaushik, « An overview of Technical aspect for WiFi Networks Technology ». [En ligne]. Disponible sur: www.ijecse.org

[14] Pravin Bhagwat, « Bluetooth: Technology for Short-Range Wireless Apps », mai 2001. [En ligne]. Disponible sur: http://computer.org/internet/

[15] ▪ Abdelhamid, E. Hassani ▪, Y. Kharbane, ▪ Hatim Boudabza ▪, M. Ouddaf, et N. Harti, « Resume de Blutooth », Faculté des Sciences et Techniques, Fès Sais, 2014. [En ligne]. Disponible sur: http://mstsir2014.wordpress.com/

Bibliographie

[16] M. Verma, S. Singh, et B. Kaur, « An Overview of Bluetooth Technology and its Communication Applications », *1588| International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 5, nº 3, mai 2015, [En ligne]. Disponible sur: http://inpressco.com/category/ijcetGeneralArticle

[17] Rémy HUBSCHER, « ZigBee Documentation », sept. 2017.

[18] M. C. Ramya, M. Shanmugaraj, et R. Prabakaran, « STUDY ON ZIGBEE TECHNOLOGY », 2011.

[19] Qiang Zhang, Yugeng Sun, et Zhenhui Cui, « Application and Analysis of ZigBee Technology for Smart Grid », Tianjin: IEEE, 2010.

[20] « Disadvantages of Zigbee », 2012. https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-zigbee.html (consulté le 5 mai 2023).

[21] U. Raza, P. Kulkarni, et M. Sooriyabandara, « Low Power Wide Area Networks: An Overview », juin 2016, [En ligne]. Disponible sur: http://arxiv.org/abs/1606.07360

[22] M Rouse, « LPWAN (Low Power Wide Area Network) », septembre 2017. [http://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/LPWAN -low-power-wide-area-network], (consulté le 27 avril 2023).

[23] George Margelis, Robert Piechocki, Dritan Kaleshi, et Paul Thomas, « Low Throughput Networks for the IoT:Lessons Learned From Industrial Implementations », 2015.

[24] S Shea, « LPWAN (low-power wide area network) », sept. 2017, Consulté le: 27 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/LPWAN-low-power-wide-area-network

[25] M. Bor, J. Vidler, et U. Roedig, « LoRa for the Internet of Things ». Consulté le: 4 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/77615/1/MadCom2016_LoRa_MAC.pdf

[26] Célia Garcia-Montero, « LoRa : comment fonctionne le réseau IoT ? », 2 décembre 2022.

[27] S. Montagny, « LoRa-LoRaWAN et l'Internet des Objets UNE TECHNOLOGIE SANS FIL, BASSE CONSOMMATION ET LONGUE PORTÉE ». [En ligne]. Disponible sur: www.univ-smb.fr/lorawan

[28] R. Kufakunesu, G. P. Hancke, et A. M. Abu-Mahfouz, « A survey on adaptive data rate optimization in lorawan: Recent solutions and major challenges », *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, nº 18. MDPI AG, p. 1-25, 2 septembre 2020. doi: 10.3390/s20185044.

[29] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, et F. Meyer, « A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment », *ICT Express*, vol. 5, nº 1, p. 1-7, mars 2019, doi: 10.1016/j.icte.2017.12.005.

Bibliographie

[30] N. Gonzalez, « Architectures protocolaires interopérables pour le réseau de collecte de l'Internet des objets ». [En ligne]. Disponible sur: https://theses.hal.science/tel-03270739

[31] L. Vangelista, « Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation », *IEEE Signal Process Lett*, vol. 24, nº 12, p. 1818-1821, déc. 2017, doi: 10.1109/LSP.2017.2762960.

[32] A. AElSabaa, M. Ward, et W. Wu, « Hybrid Localization techniques in LoRa-based WSN », Lancaster UK: International Conference on Automation & Computing, Lancaster University, 2019.

[33] S. Gezici, « A survey on wireless position estimation », *Wirel Pers Commun*, vol. 44, nº 3, p. 263-282, févr. 2008, doi: 10.1007/s11277-007-9375-z.

[34] G. Mao et B. Fidan, *Localization algorithms and strategies for wireless sensor networks*. Information Science Reference, 2009.

[35] BOUKHARI Nawel, « Auto-localisation dans les réseaux de capteurs sans fil », 2016.

[36] K. Langendoen et N. Reijers, « Distributed localization in wireless sensor networks: A quantitative comparison », *Computer Networks*, vol. 43, nº 4, p. 499-518, nov. 2003, doi: 10.1016/S1389-1286(03)00356-6.

[37] Dalce R, « Méthodes de localisation par le signal de communication dans les réseaux de capteurs sans fil en intérieur », 2013.

[38] A. Theljeoui, « Système hybride de localisation des personnes âgées dans un habitat intelligent ». [En ligne]. Disponible sur: https://theses.hal.science/tel-03124765v2

[39] F. Dai, Y. Liu, et L. Chen, « A hybrid localization algorithm for improving accuracy based on RSSI/AOA in wireless network », in *Proceedings - 2012 International Conference on Computer Science and Service System, CSSS 2012*, 2012, p. 631-634. doi: 10.1109/CSSS.2012.163.

[40] I. Amundson et X. D. Koutsoukos, « A Survey on Localization for Mobile Wireless Sensor Networks ».

[41] W Dargie et C Poellabauer, « FUNDAMENTALS OF WIRELESS SENSOR NETWORKS ».

[42] J. Maceraudi, « Algorithmes de radiolocalisation et traitements adaptés à une architecture de récepteur IR-UWB intégrée ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/325964990

[43] K. Langendoen et N. Reijers, « Distributed localization in wireless sensor networks: A quantitative comparison », *Computer Networks*, vol. 43, nº 4, p. 499-518, nov. 2003, doi: 10.1016/S1389-1286(03)00356-6.

[44] Djaaoui Sabrine, « Optimisation des réseaux de neurones par PSO », Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, 2015.

[45] U. Larbi, B. M'hidi, et O. El-Bouaghi, « République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique ».

Bibliographie

[46] Y. Djeriri, « Les Réseaux de Neurones Artificiels ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/319939107

[47] ROUDANE Saliha, « Sélection de modèles pour l'apprentissage automatique », université Dr. Tahar Moulay , Saida, 2021.

[48] F. Farhadi, A. Lodi, et V. Partovi Nia, « Titre: Title: Learning Activation Functions in Deep Neural Networks Open Access document in PolyPublie URL de PolyPublie », 2017. [En ligne]. Disponible sur: https://publications.polymtl.ca

[49] HOUAZENE Sabrina et MANSOUR Souad, « Détection des scripts publicitaires á base d'apprentissages automatique profond », Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2019.

[50] A. Apicella, F. Donnarumma, F. Isgrò, et R. Prevete, « A survey on modern trainable activation functions », *Neural Networks*, vol. 138. Elsevier Ltd, p. 14-32, 1 juin 2021. doi: 10.1016/j.neunet.2021.01.026.

[51] C. Enyinna Nwankpa, W. Ijomah, A. Gachagan, et S. Marshall, « Activation Functions: Comparison of Trends in Practice and Research for Deep Learning ».

[52] G. Dreyfus, « les réseaux de neurones pour la modélisation des procédés industriels : du ruban adhésif au soudage par points », sept. 2002, [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/249833084

[53] C. Touzet, « les réseaux de neurones artificiels introduction au connexionnisme cours, exercices et travaux pratiques », 1992.

[54] H. et W. Rumelhart, « Learning representations by back-propagating errors. », 1986.

[55] K ZAKARIA et Y BELKHIR, « Application de la méthode des réseaux de neurones pour la prédiction de la température de coupe en tournage », OUARGLA, juin 2022.

[56] MESSAOUDI Sofiane et ARROUL Benyamine, « Reconnaissance des caractères manuscrits de la langue berbère par Deep Learning appliqué à la base de données Berbère Dataset », Université Abderrahmane Mira, Béjaia, 2021.

[57] TERAI Salim, « Algorithme Hybride de Débruitage Image/Vidéo à base de Réseaux de Neurones Convolutionnels (CNN). », Bordj Bou Arreridj, sept. 2021.

[58] M. Yessin AMMAR, « Mise en oeuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu ».

[59] U. Akli et M. Oulhadj -Bouira, « République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique ».

[60] C. Etienne, « Apprentissage profond appliqué à la reconnaissance des émotions dans la voix », Université Paris-Saclay, paris, 2019.

[61] N. Ketkar et J. Moolayil, *Deep Learning with Python*. Apress, 2021. doi: 10.1007/978-1-4842-5364-9.

[62] SLIMI Wafa, « Commande d'un four électrique par réseau de neurone », Université .Badji Moukhtar , Annaba, 2018

Bibliographie

[63] H. Bhavsar et A. Ganatra, « A Comparative Study of Training Algorithms for Supervised Machine Learning », 2012.

[64] B Samah et B Sara, « Conception et réalisation d'un système de capteurs sans fil pour la maintenance prédictive des machines », Universitaire Abdelhafid Boussouf , Mila, 2020.

[65] « Omatom Power Lora SX1278 Long Range RF Wireless Module 433MHZ, For Industrial ». https://www.indiamart.com/proddetail/esp-01-adapter-wifi-module-23131242962.html?mini_pdp=y (consulté le 12 mai 2023).

[66] « Module LoRa SX1278, Ra-02 433M 433MHz avec antenne ». https://mhtronic.com/produit/module-lora-sx1278-ra-02-433m-433mhz-avec-antenne/ (consulté le 12 mai 2023).

[67] ANWAR Oualid et BENAHMED Hayet, « Systèmes multi-antennes PIFA pour des applications en diversité », Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 2020.

[68] Dvijen Trivedi, Aniruddha Khade, et Kashish Jain, « SPI to I2C Protocol Conversion using Verilog », 2018.

[69] S. Systech, « SSD1306 », avr. 2008. [En ligne]. Disponible sur: http://www.solomon-systech.com

[70] ROZTANE Adel et ALI MERINA Weam, « Utilisation des objets connectés dans la gestion efficace des poteaux incendie », Ecole supérieur en science appliqueés, Telemcan, 2022.

[71] Milica Lekić et Gordana Gardašević, « IoT sensor integration to Node-RED platform », mars 2018.

[72] P. Degreef, D. Van Merode, et G. Tabunshchyk, « Low-Cost, Open-Source Automation System for Education, with Node-RED and Raspberry Pi », in *Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, 2019, p. 458-465. doi: 10.1007/978-3-319-95678-7_51.

[73] « FlowForge Docs ». https://flowforge.com/docs/ (consulté le 5 mai 2023).

[74] « Qu'est-ce que le protocole MQTT ? » https://aws.amazon.com/fr/what-is/mqtt/ (consulté le 16 mai 2023).

[75] « Gestion de MQTT », 25 mai 2022. https://doc.pcsoft.fr/?1000023082 (consulté le 17 mai 2023).

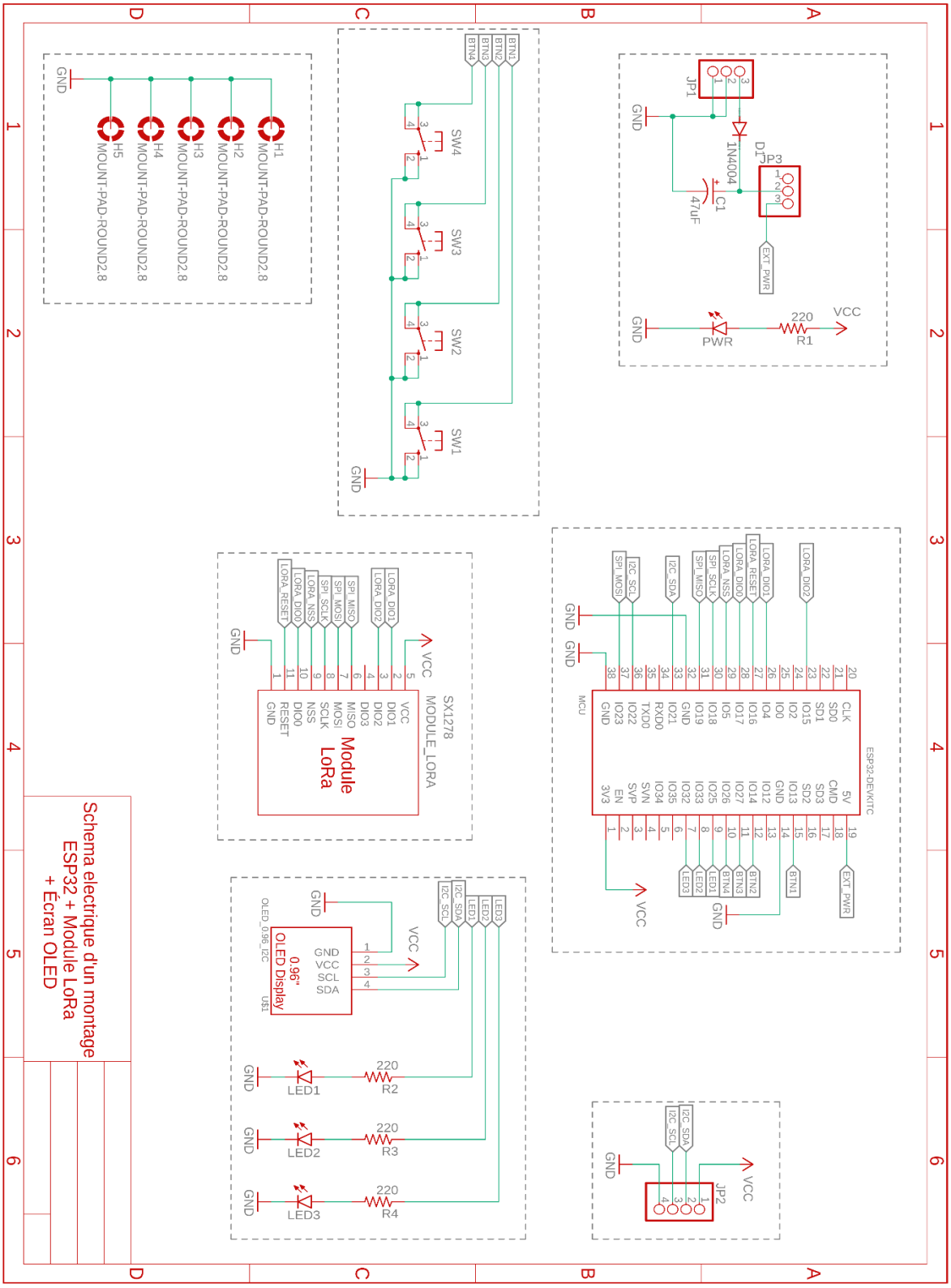
[76] « MQTT Topics, Wildcards, & Best Practices - MQTT Essentials: Part 5 », 2019. https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-5-mqtt-topics-best-practices/ (consulté le 10 mai 2023).

[77] Gheribi Ahmed et Kermezli Abdeldjalil, « Conception et réalisation d'un système de contrôle et supervision de la température d'un four géré par ESP8266 et Protocol MQTT », UNIVERSITE DR. YAHIA FARES , MEDEA, 2022.

Annexe

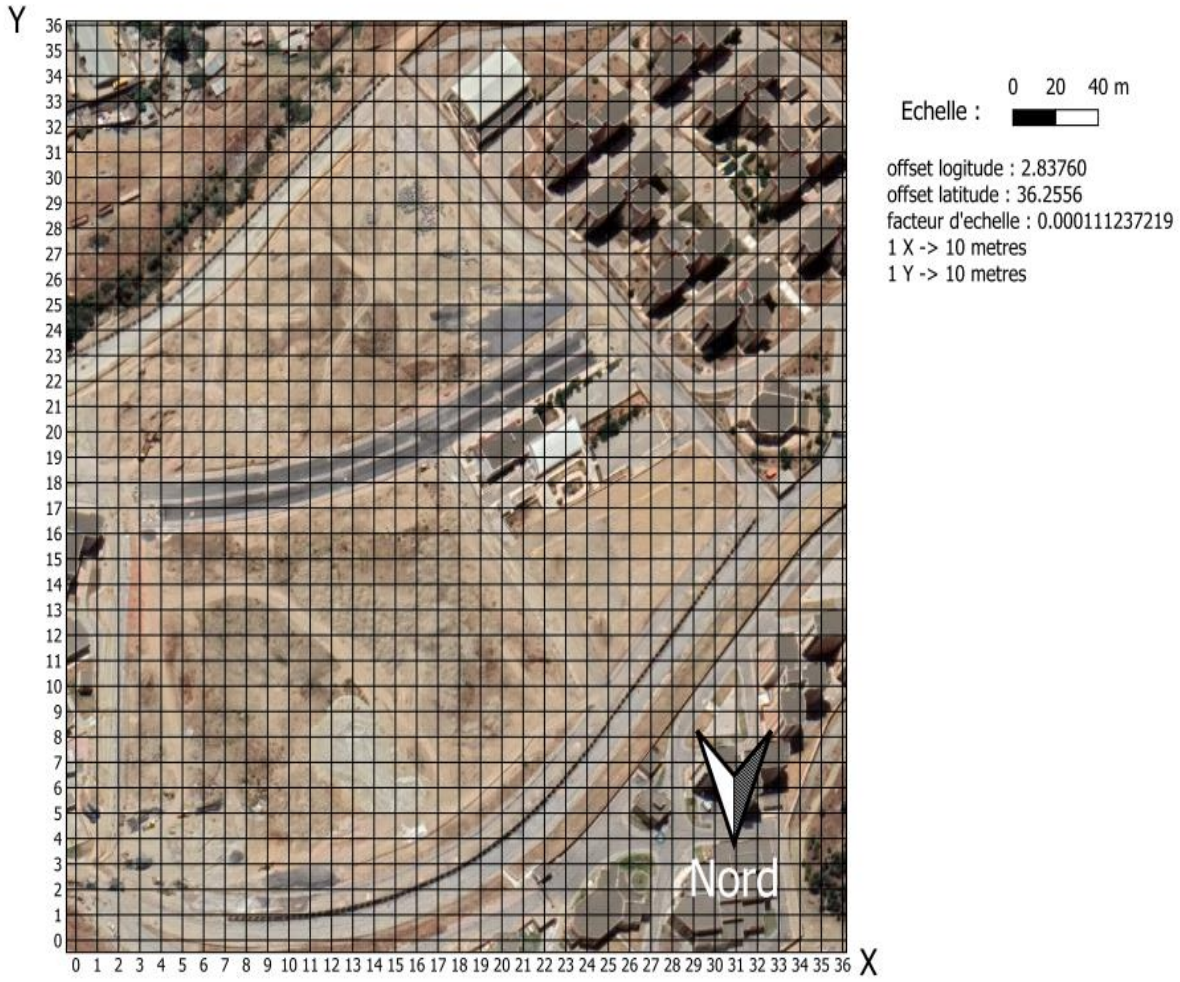
Annexe A :

Schéma électronique des nœuds



Annexe B

La carte du campus universitaire de Ouzera



Annexe C :

Tableau des données expérimentales

RSSIs				Coordonées réels		Coordonnées estimé par modèle de distance		Coordonnées estimé par modèle XY		Erreur des deux modèles	
Rssi 1	Rssi 2	Rssi 3	Rssi 4	X	Y	X	Y	X	Y	Erreur1	Erreur2
-87	-102	-43	-87	6	26	9,915	21,140	6,326	27,908	6,241	1,936
-79	-88	-69	-83	5	27	12,018	16,983	7,083	18,669	12,231	8,588
-80	-87	-65	-82	7	27	12,273	17,807	6,736	20,123	10,598	6,882
-84	-100	-68	-81	8	28	10,947	17,710	5,390	22,473	10,704	6,112
-84	-83	-79	-78	9	29	14,141	17,088	12,987	14,597	12,974	14,944
-85	-81	-82	-72	10	30	15,211	17,098	18,620	15,786	13,915	16,624
-90	-83	-88	-75	11	31	16,119	18,926	22,042	17,957	13,115	17,089
-87	-83	-85	-73	12	32	15,264	17,215	20,237	16,008	15,141	17,988
-82	-72	-86	-74	13	33	15,796	15,448	19,719	19,822	17,773	14,792
-91	-66	-82	-70	14	34	18,637	21,094	20,329	26,793	13,714	9,591
-85	-63	-88	-70	15	35	17,524	16,454	19,887	27,290	18,717	9,129
-85	-50	-88	-72	14	34	18,742	17,053	16,203	34,756	17,598	2,329
-98	-58	-90	-80	16	33	21,617	24,682	18,501	36,306	10,037	4,146
-89	-57	-85	-79	17	32	19,014	21,014	16,617	31,596	11,169	0,557
-91	-64	-85	-75	18	31	19,079	21,807	19,040	28,702	9,256	2,523
-90	-63	-80	-73	19	30	18,377	20,855	18,814	27,290	9,166	2,716
-91	-69	-82	-90	20	29	18,260	23,997	19,050	23,987	5,296	5,102
-104	-71	-79	-75	21	28	19,998	25,608	21,908	29,275	2,593	1,565
-92	-68	-79	-76	22	27	18,278	22,249	19,904	24,812	6,036	3,030
-97	-70	-83	-81	23	26	19,569	24,946	20,553	26,952	3,589	2,626
-93	-68	-85	-77	24	25	19,301	23,226	19,849	27,224	5,023	4,709
-99	-73	-83	-84	25	24	19,590	25,974	21,089	25,957	5,758	4,373
-89	-75	-80	-74	26	23	16,829	20,224	19,835	20,244	9,582	6,753
-89	-73	-77	-75	27	22	16,816	20,540	18,540	20,805	10,288	8,544
-92	-70	-82	-67	28	21	18,618	21,342	22,338	24,953	9,388	6,905
-88	-66	-90	-69	29	20	17,996	17,851	21,669	27,438	11,212	10,443
-92	-69	-77	-67	30	19	18,218	21,271	21,365	24,061	11,999	10,009
-87	-71	-83	-67	31	18	17,202	18,295	22,140	22,143	13,801	9,781
-87	-69	-84	-54	32	17	18,286	17,648	26,187	23,683	13,729	8,857
-83	-74	-83	-54	33	16	17,248	16,313	27,036	19,135	15,755	6,738
-82	-68	-85	-66	32	15	16,863	15,770	21,446	21,983	15,156	12,655
-90	-82	-84	-66	31	14	16,926	19,680	24,691	18,038	15,177	7,491
-80	-94	-87	-44	28	14	15,989	14,494	31,877	14,092	12,022	3,878
-83	-97	-89	-56	28	13	14,869	14,747	26,964	13,538	13,247	1,168
-78	-96	-94	-61	27	12	14,572	12,418	26,122	10,454	12,435	1,778
-84	-96	-90	-68	26	11	13,873	14,696	21,757	12,224	12,677	4,416

-77	-92	-78	-75	25	10	12,501	15,289	9,423	12,608	13,572	15,794
-79	-98	-84	-80	24	9	11,398	14,549	10,279	11,741	13,769	13,992
-75	-97	-89	-77	23	8	12,032	13,066	12,699	7,740	12,081	10,304
-74	-87	-85	-85	22	7	12,199	13,579	12,084	7,573	11,805	9,932
-81	-89	-85	-80	21	6	12,970	14,945	13,552	10,704	12,020	8,809
-87	-95	-98	-82	20	5	13,058	13,528	20,485	12,223	10,996	7,239
-72	-89	-97	-83	19	4	13,383	10,446	15,951	7,498	8,550	4,640
-78	-92	-90	-90	18	3	11,285	13,389	12,811	7,835	12,370	7,093
-70	-98	-91	-87	17	3	10,400	12,057	10,756	5,369	11,206	6,678
-76	-91	-91	-85	16	3	12,133	12,842	13,837	6,685	10,575	4,273
-74	-99	-94	-76	15	3	12,264	11,946	15,605	6,025	9,355	3,085
-84	-90	-89	-88	16	3	12,255	14,722	14,002	11,277	12,306	8,515
-69	-93	-95	-85	13	3	12,051	10,880	12,772	3,616	7,937	0,656
-66	-93	-89	-85	12	3	11,287	11,690	10,880	4,040	8,719	1,529
-63	-94	-97	-81	11	3	12,787	9,143	12,061	2,897	6,398	1,066
-66	-87	-87	-81	10	3	12,491	11,896	11,567	3,669	9,238	1,704
-66	-93	-92	-84	9	3	11,738	11,081	11,313	3,450	8,533	2,357
-67	-93	-95	-83	9	2	12,305	10,485	12,545	3,399	9,106	3,811
-60	-98	-95	-81	8	2	11,631	9,655	10,052	3,111	8,472	2,333
-55	-98	-95	-84	7	2	11,164	9,069	8,620	2,651	8,204	1,746
-67	-93	-85	-80	6	2	11,625	12,491	9,854	5,726	11,904	5,361
-73	-90	-89	-83	5	2	12,249	12,694	13,013	5,688	12,919	8,821
-76	-86	-82	-80	4	2	12,861	14,492	11,601	9,277	15,316	10,523
-76	-87	-84	-82	3	2	12,607	14,123	12,022	8,557	15,468	11,153
-79	-94	-98	-80	2	2	13,183	11,741	19,111	9,055	14,830	18,509
-82	-89	-95	-79	2	3	13,793	13,049	19,920	12,276	15,494	20,179
-78	-87	-88	-82	2	4	12,971	13,769	14,911	9,209	14,690	13,923
-79	-93	-87	-82	2	5	12,092	14,107	12,294	9,316	13,594	11,162
-84	-87	-86	-82	2	6	13,341	15,501	15,064	12,632	14,795	14,651
-82	-87	-84	-85	2	7	12,706	15,313	12,368	11,616	13,555	11,349
-84	-90	-87	-86	2	8	12,433	15,124	13,180	11,433	12,633	11,696
-81	-96	-85	-83	2	9	11,510	14,746	10,614	11,626	11,112	9,005
-84	-88	-83	-79	2	10	13,450	16,099	13,476	12,829	12,973	11,819
-77	-91	-85	-85	2	11	11,771	14,081	11,422	9,469	10,245	9,545
-74	-88	-80	-80	2	12	12,360	14,432	10,300	9,959	10,642	8,548
-83	-88	-80	-88	2	13	12,143	16,106	10,786	14,825	10,609	8,973
-91	-86	-83	-78	2	14	17,188	23,203	16,227	17,484	17,759	14,647
-88	-85	-77	-81	2	15	14,387	19,045	11,008	16,948	13,031	9,216
-81	-83	-81	-80	2	16	13,620	15,819	13,117	12,604	11,621	11,624
-80	-88	-81	-77	2	17	13,191	15,490	11,693	11,778	11,293	11,010
-80	-85	-72	-79	2	18	13,066	16,971	8,573	16,197	11,114	6,815
-88	-84	-78	-79	2	19	14,764	19,041	12,518	16,604	12,764	10,788
-85	-93	-69	-80	2	20	12,423	18,336	6,533	21,049	10,555	4,653
-90	-91	-65	-88	2	21	13,264	21,383	7,661	23,609	11,271	6,233
-89	-92	-61	-83	2	22	12,986	20,984	6,520	24,244	11,033	5,047
-93	-96	-63	-81	2	23	14,204	23,382	6,305	25,266	12,210	4,865

Annexes

-82	-96	-66	-81	3	24	11,328	17,752	5,424	21,714	10,411	3,332
-80	-98	-63	-85	4	25	10,196	17,523	4,873	22,451	9,711	2,694
-77	-99	-63	-79	5	26	10,538	17,092	4,208	21,802	10,489	4,272
-84	-97	-43	-76	6	26	11,308	20,783	6,174	26,436	7,443	0,469
-79	-95	-77	-85	24	23	10,922	15,567	7,880	15,785	15,042	17,661
-78	-93	-80	-79	3	17	12,051	15,096	9,427	12,250	9,249	7,992
-80	-97	-94	-81	4	17	12,141	13,000	16,438	7,657	9,070	15,556
-82	-89	-86	-77	5	17	13,445	15,032	15,679	11,227	8,672	12,140
-95	-90	-88	-89	6	17	18,581	27,590	15,380	17,824	16,444	9,416
-81	-101	-93	-81	7	17	11,402	13,390	13,900	9,152	5,693	10,450
-85	-87	-97	-79	8	17	14,386	13,199	21,637	15,314	7,432	13,741
-91	-89	-90	-82	9	17	14,255	17,159	18,685	15,897	5,257	9,747
-79	-93	-83	-82	9	18	11,884	14,769	10,441	11,312	4,330	6,841
-90	-87	-86	-73	10	18	15,606	18,727	20,092	16,398	5,653	10,219
-85	-89	-83	-83	11	18	12,951	16,218	11,761	13,299	2,642	4,762
-89	-93	-94	-83	12	18	13,161	14,975	19,155	13,073	3,240	8,687
-83	-91	-84	-80	13	18	12,824	15,524	12,218	12,186	2,482	5,866
-82	-86	-98	-82	14	18	14,212	12,080	19,735	14,570	5,923	6,682
Moyenne des erreurs										10,84935	7,9296