

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOUHAND OULHADJ - BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département : Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

HAMI Salma
CHERARAK Kenza

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : Télécommunication
Option : Systèmes des Télécommunications

Thème :

**Localisation d'un Emetteur Mobile à Base des Modules
XBee ZigBee.**

Devant le jury composé de :

Mr. AYAD Mouloud	MCA	UAMOB	Président
Mr. MEDJEDOUB Smail	MAA	UAMOB	Encadreur
Mr. ALI MOHAD Abdenour	MCA	UAMOB	Examinateur
Mr. SAOUD Bilal	MAA	UAMOB	Examinateur

Année Universitaire 2018/2019

Remerciements

Avant tout, J'aimerais remercier mon dieu **Allah**, qui m'a donné la Santé ; la volonté et le courage pour me permettre de finaliser ce projet.

Il nous est offert ici, par ces quelques lignes, la possibilité de remercier les personnes qui ont contribué à faire ce mémoire.

Nous tenons tout particulièrement à remercier notre encadreur Mr S.MEDJEDOUB, pour le savoir qu'il nous a inculqué, pour ses précieux conseils et orientations, et surtout pour le soutien qu'il nous a témoigné ; merci.

Nous tenons également à remercier les membres du jury qui me font le Grand honneur d'évaluer ce travail, et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, notamment LES ENSEIGNANTS du département de Génie Électrique de l'Université de Bouira pour leur soutien et leur aide, pour tous cela nous vous disons « Merci ».

Je tiens également à remercier notre ami et camarade, Dahi Mazigh pour son aide au long de la préparation de ce mémoire.

Je remercie finalement, nos familles pour leurs encouragement, et soutien.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail :

A nos chers parents : pour leur indéfectible soutien, leurs encouragements durant toutes ces années : nous leur témoignons notre respect et notre affection.

A nos chers frères et sœurs : toujours présents et disponibles à nos côtés, que dieu vous protège.

A tous nos amis : dont la liste est tellement longue.

A toutes les personnes : qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

SALMA ET KENZA

Résumé

Les systèmes de localisation sont de plus en plus utilisés, et devenaient un outil indispensable dans nombreux domaines, soit en termes de localisation, ou en localisation en temps réel.

Notre travail consiste à une implémentation d'un système de communication basé sur le protocole ZigBee, afin de pouvoir mesurer les distances séparant les deux entités en communication, en mesurant la puissance du signal reçu, dans le but de localisation en espace indoor.

Le système proposé et les mesures ont été validés, par une réalisation d'une chaîne de communication basée essentiellement sur des modules XBee et de cartes Arduino.

Mots clés : localisation, RSS, Technique de localisation, méthodes de localisation, ZigBee, Arduino.

Abstract

Localization systems are increasingly in use, and become an indispensable tool in many areas, either in terms of localization, or in localization in real time.

Our work consists in an implementation of a communication system based on the ZigBee Protocol, in order to be able to measure the distances separating the two entities in communication, by measuring the power of the received signal, for the purpose of localization in indoor space.

The proposed system and the measurements are validated, by a realization of a communication chain based on XBee modules, and Arduino board.

Keywords: localization, RSS, techniques of localization, methods of localization, ZigBee, Arduino.

ملخص

تعد أنظمة التوقيع من بين الأنظمة الأكثر الاستخدام يوماً بعد يوم , و أصبحت أداة لا غنى عنها في العديد من المجالات .
الغرض من العمل المقدم هو تنفيذ نظام اتصالات قائم على بروتوكول ZigBee من أجل قياس المسافات التي تفصل بين اداتي الاتصال , من خلال قياس قوة الإشارة , لغرض تحديد الموقع في الفضاء الداخلي .
تم التحقق من صحة النظام المقترح والقياسات، من خلال تحقيق التواصل على أساس وحدات XBee ، ولوحة
.arduino

الكلمات المفتاحية: التوقيع ، RSS ، تقنيات التوقيع , طرق التوقيع , ZigBee , Arduino .

Sommaire	i
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
Liste des Abréviations	vi
Introduction Générale	1

Chapitre I : Etat de l'art sur la localisation.

I.1. Introduction.....	2
I.2. La localisation	2
I.2.1. Qu'es ce qu'un système de localisation	2
I.2.2. Architecteur d'un système de localisation	3
I.2.3. Classification des technologies de localisation	3
I.3. Les principaux systèmes de localisation	4
I.3.1. Les réseaux satellitaires	4
I.3.2. Les réseaux terrestre	6
I.3.3. Autre système de localisation	8
I.4. Les méthodes et techniques de localisation	10
I.4.1. Les techniques	10
I.4.2. Les méthodes	12
I.4.2.1. La triangulation.....	12
I.4.2.2. La Trilatération	13
I.4.2.3. La multilatération	14
I.4.3. Les algorithmes de localisation	15
I.5. Les source d'erreur dans les systèmes localisation.....	16
I.6. NLOS	17
I.7. Conclusion	18

Chapitre II : Matériel et logiciel à mettre en œuvre.

II.1. Introduction	19
II.2. Indicateur de puissance du signal reçu	19
II.3. Problème de puissance du signal	21
II.3.1. Récapitulatif des effets de la propagation sur la localisation basée en RSSI	22
II.4. Le standard 802.15.4	23
II.4.1. La norme ZigBee	23
II.4.2. Le module XBee	25
II.4.2.1. Caractéristiques du module ZigBee de Digi	26
II.4.2.2. XBee Adressages et canaux	27
II.4.3. Logiciel xctu	29
II.5. Arduino	30
II.5.1. Le Matériel arduino	30
II.5.2. Le logiciel arduino	32
II.6. Conclusion	33

Chapitre III : Mesures pratiques.

III.1. Introduction	34
III.2. Description du schéma pratique	34
III.2.1. Matériels utilisés	34
III.2.2. Description du montage	37
III.2.3. Configuration du XBee	38
III.3. Testes pratiques et résultats	40
III.3.1. Mesures pratiques des niveaux de RSS	40
III.3.2. Mesures expérimental via le logiciel Xctu	43
III.4. Calcul des distances	46
III.4.1. Distances mesurées par Matlab	47

III.4.2. Distances calculés par mesures RSS via Xctu	49
III.5. L'erreur de mesures des distances	50
III.6. Conclusion	51
Conclusion Général.....	52
Bibliographie	53

Figure I. 1: Diagramme bloc des systèmes de géolocalisation sans fil	3
Figure I. 2: Constellation GPS	5
Figure I. 3: Composition du système GPS.	6
Figure I. 4: Structure du réseau GSM pour les applications de localisation.	7
Figure I. 5: Schéma représentatif d'un système RFID.	9
Figure I. 6: Le principe de triangulation	12
Figure I. 7: Le principe de Trilatération	14
Figure I. 8: Le principe de multilatération	15
Figure I. 9: Environnement LOS et NLOS.	18
Figure II. 1: Trilatération à partir de trois mesures RSS	21
Figure II. 2: Effets du canal de propagation.	22
Figure II. 3: Architecture ZigBee.	24
Figure II. 4: Model et architecture principale du module XBee.	25
Figure II. 5: Interface principal du logiciel Xctu.	29
Figure II. 6: Carte arduino UNO	31
Figure II. 7: L'environnement de de programmation arduino.	33
Figure III. 1: Schémas de principe du montage utilisé.	34
Figure III. 2: Schéma électrique du montage pratique.	38
Figure III. 3: Paramètres du module de réception.	39
Figure III. 4: Connexion des deux modules XBee.	40
Figure III. 5: Environnement pratique (couloire au niveau de la faculté).	41
Figure III. 6: Courbes RSS calculé et la courbe du RSS mesurés en fonction de la distance.	43
Figure III. 7: Application de mesure RSS sous Xctu (test range).	44
Figure III. 8: Courbes du RSS (n) calculé et la courbe du RSS moyenne	46
Figure III. 9: Distances calculées en fonction de la distance réelle.	48
Figure III. 10: Courbe des distances mesurées et courbe des distances réelles.	49
Figure III. 11: MSE des mesures RSS.	50

Tableau I. 1 : Environnements d'utilisation des principaux systèmes de localisation.....	4
Tableau I. 2 : Résumé des principales techniques de localisation.....	12
Tableau II. 1: Valeurs d'exposant n.	20
Tableau II. 2: Caractéristiques du module ZigBee 3 de digi.....	27
Tableau II. 3 : Type d'adressage en norme ZigBee.	28
Tableau III. 1 : Matériels utilisés dans la chaîne de transmission.....	36
Tableau III. 2 : mesures RSS obtenue par le programme Matlab.	42
Tableau III. 3 : Mesures RSS obtenue par Xctu.....	45
Tableau III. 4 : Distances calculés à partir des mesures RSS.	47
Tableau III. 5 : Distance calculé à partir des mesures RSS.....	49

Liste des acronymes

CNA	Convertisseur Numérique Analogique.
COM	Component Object Model.
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service.
FFD	Full function device.
HLR	Home Location Register.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IANA	Internet Assigned Numbers Authority.
IP	Internet Protocol.
IDE	Integrate Development Environment.
GSM	Global System for Mobile Communications.
LOP	Line Of Position.
LORAN	Long Range Navigation.
LMU	Location Measurement Unit.
MS	Mobile Station.
MAC	Medium Access Control.
MCS	Modulation and Coding Schem
PWM	Pulse Width Modulation.
PAN	Personnel Area Network.
RFD	Reduced function device.
RF	Radio Frequency.
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RFID	Radio Frequency Identification.
RX	Receiving X.
SIM	Subscriber Identity Module.
TX	Transfer x.
UWB	Ultra Wide Band.
WEP	Wired Equivalent Privacy.
WLAN	Wireless Local Area Network.
WPA	Wifi Protected Access.
WSN	Wireless Sensor Network.

Introduction Générale

L'utilisation étendue des équipements électroniques sans fil (téléphones mobile, tablettes, montres...) a donné naissance naturellement à l'idée de fournir des services en fonction de la position de l'utilisateur : un besoin de localisation est donc apparu.

L'information sur la position a été, dans un premier temps, utilisée pour la sécurité des usagers (l'assistance aux personnes en danger).

Elle a ensuite, servi pour une utilisation optimale des services proposés sur le réseau tels que l'aide à la navigation. La qualité de ces services est étroitement liée à la précision de positionnement. Un intérêt considérable s'est alors développé au sein des communautés scientifique et industrielle pour les techniques de localisation.

Aujourd'hui, il existe différentes technologies de positionnement, qui peuvent être utilisées à des fins de localisation, comme les réseaux cellulaires (GSM), les réseaux WLAN (Wifi), ainsi que les réseaux WPAN, le système GPS,...etc. Ces systèmes de localisations utilisant les ondes radio, sont basés sur des métriques et des méthodes de localisation, les métriques visent les techniques de mesure de la distance (TOA, TDOA, RSS...), ou d'angles (AOA). Et les méthodes de localisation (trilatération, triangulation, latération) qui représentent les algorithmes de positionnement utilisés par les systèmes de géolocalisations. Autrement, il existe d'autres techniques (IP, Cell-ID, ...), qu'elles n'exigent pas une infrastructure précise au contraire, seulement une base de données suffisante, dans notre travail on s'intéresse à la technique de localisation par exploitation de puissance du signal reçu. [1]

Nous débutons notre étude dans le premier chapitre par des généralités sur les moyens de géolocalisation, ainsi que leurs caractéristiques, et les différentes techniques et méthodes utilisées. Le deuxième traite la technique de localisation par mesure RSS, aborde la technologie ZigBee, et arduino qui seront utilisés dans la partie pratique de notre travail, finalement le dernier chapitre présente les résultats pratiques des mesures effectuées qui seront par la suite discutés .et nous terminons par une conclusion générale suivi par des perspectives envisagées.

Chapitre I

Etat de l'art sur la localisation

I. Etat de l'art sur la localisation

I.1. Introduction :

Aujourd'hui, se localiser est une nécessité absolue, qui est suivie d'un large développement des moyens de localisation, soit en espace libre, soit dans l'espace confiné. Cependant, certains systèmes de localisation ne répondent pas au besoin de l'utilisateur et précisément en localisation indoor à cause de la présence d'obstacles, d'où les moyens de localisation indoor s'interviennent (UWB, WIFI, RFID...).

Dans ce chapitre on va présenter des généralités sur la localisation et les systèmes de localisation, ainsi les différentes techniques de localisation existantes.

I.2. La localisation :

Est un procédé permettant de positionner un objet, un véhicule, ou une personne sur un plan ou une carte à l'aide de ses coordonnées géographiques, certains systèmes permettent également de connaître l'altitude (localisation dans l'espace en 3D).

Cette opération est réalisée à l'aide d'un terminal capable d'être localisé grâce à un système de positionnement par satellite et un récepteur GPS par exemple ou par d'autres techniques de plus le terminal est en mesure de publier en temps réel ou de façon différée ses coordonnées géographiques.

I.2.1. Qu'est-ce qu'un système de localisation :

Un système de géolocalisation le système est capable de calculer sa position en se basant sur le nombre de lecteurs qui détectent le tag et de déduire sa position approximative. Une fois les coordonnées géographiques identifiées il faut pouvoir les matérialiser, c'est-à-dire les transformer en une position sur une cartographie. C'est le deuxième maillon indispensable à la géolocalisation : une base de données cartographique numérique associée à un logiciel capable de réceptionner les coordonnées envoyées par le terminal mobile et de les transformer en une position ou un itinéraire sur la carte numérique [2].

2.2.2. Architecteur d'un système de localisation :

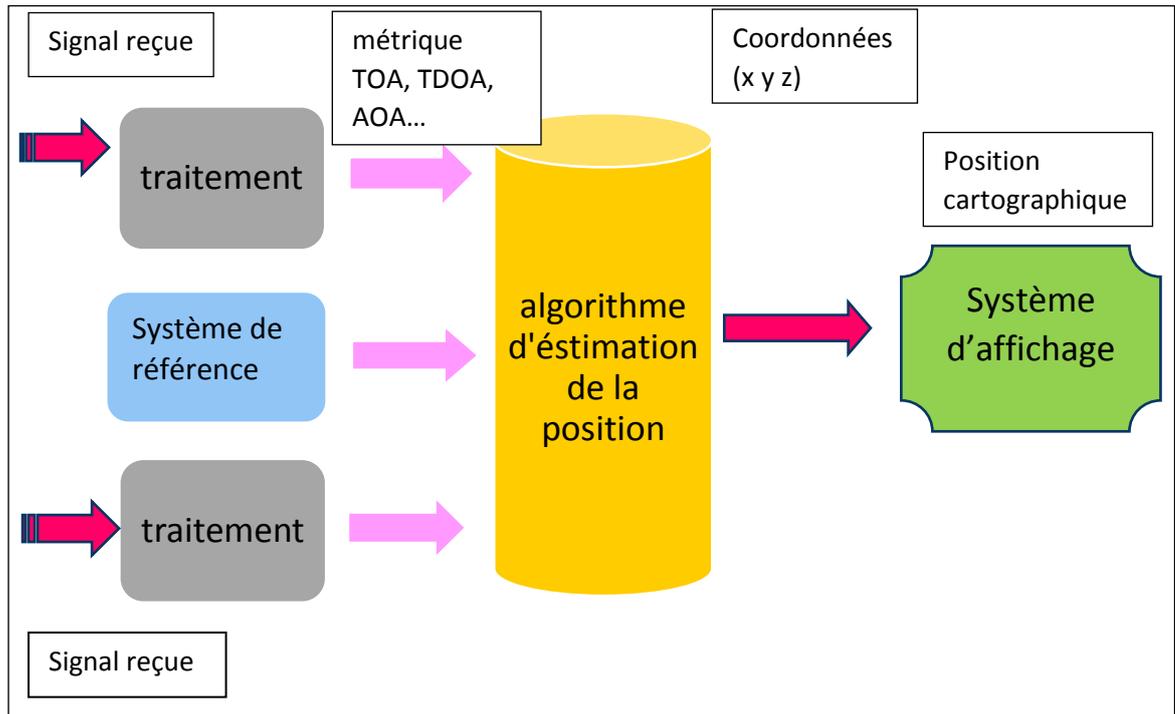


Figure I. 1: Diagramme bloc des systèmes de géolocalisation sans fil.

I.2.3. Classification des technologies de localisation :

Il existe divers type de classification des moyens de localisation soit du côté de la zone de couverture, précision, techniques de positionnement utilisé et d'autres.

Le tableau suivant représente quelques moyens de localisation selon leurs environnements d'utilisation.

Système	Indoor	Outdoor
IP	x	✓
GPS	x	✓
GSM	✓	✓
WIFI	✓	✓
RFID	✓	x

UWB,BLUETOOTH, ZIGBEE	✓	x
--------------------------	---	---

Tableau I. 1: Environnements d'utilisation des principaux systèmes de localisation

I.3. Les principaux systèmes de localisation :

I.3.1. Les réseaux satellitaires :

La localisation par satellite permet de situer sur la face terrestre, un terminal équipé d'un récepteur personnalisé. Ce terminal doit être compatible avec les signaux émis par une constellation de satellites prévue à cet effet. La position détectée et traduite en termes de latitude, longitude et parfois altitude peut alors être représentée physiquement sur une carte. Le positionnement satellites a commencé à partir des années 1970. Avant la mise en place du système GPS trois systèmes satellitaires ont été explorés :

- ✓ système Transit (U.S. Navy Navigation Satellite).
- ✓ le système U.S. Navy's TIMATION (Time navigation - 1964).
- ✓ le projet U.S. Air Force 621B.

Le programme TRANSIT a été le premier à utiliser les émissions continues d'ondes à partir de satellites.

actuellement, on peut citer 4 systèmes de positionnement par satellites, à savoir, le système américain GPS (Global Positioning System) créée en 1994, le système soviétique GLONASS opérationnel 1980 et restauré durant les années 2010. le système européen GALILEO qui va s'achever vers 2020, et le système chinois Beidou également nommé COMPASS qui est en cours de déploiement qui devrait devenir complètement opérationnel en 2020 [3].

❖ Le système GPS :

Le GPS est un système de navigation à base de satellites conçu pour fournir instantanément des informations de position, de vitesse et de temps pratiquement à n'importe quel endroit sur terre n'importe quelle heure par n'importe quelles conditions météorologique.

Le GPS permet un positionnement instantané avec une précision qui va d'une centaine de mètres à quelques mètres (95% des cas). Certains équipements permettent après corrections différées des mesures, d'atteindre des précisions de l'ordre de un mètre. Il est bien

clair que les meilleures performances nécessitent une infrastructure conséquente et engendre des coûts plus importants, le système GPS comporte 24 satellites en fonction et quatre satellites en réserve.

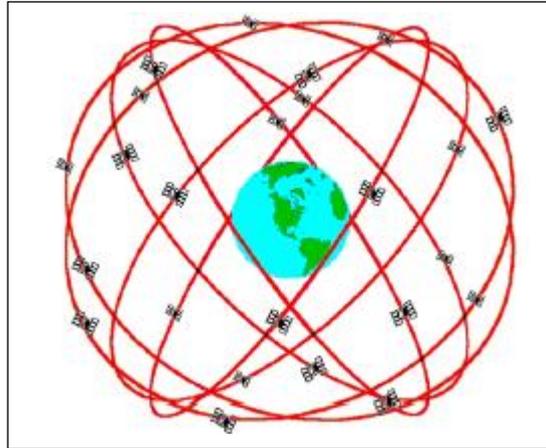


Figure I. 2 : Constellation GPS [4].

Architecture de GPS

Le système GPS se compose en trois sous-ensembles (segments) :

- le segment spatial : Comporte les 28 satellites en orbite.
- le segment utilisateur : Constitué de l'ensemble des récepteurs susceptibles de décoder les signaux de navigation transmis par les satellites, les récepteurs ne font que capter les signaux. Ils n'émettent pas C'est le récepteur qui calcule la position à partir des données que fournissent les satellites.
- Le segment de contrôle : Représente les stations terrestre qui reçoivent des informations fournies par les satellites et assure ainsi le contrôle et la mise à jour des paramètres du système (données orbitales, performances des horloges ...), suivent en tout instant le mouvement des satellites, dont l'orbite est périodiquement Corrigée.

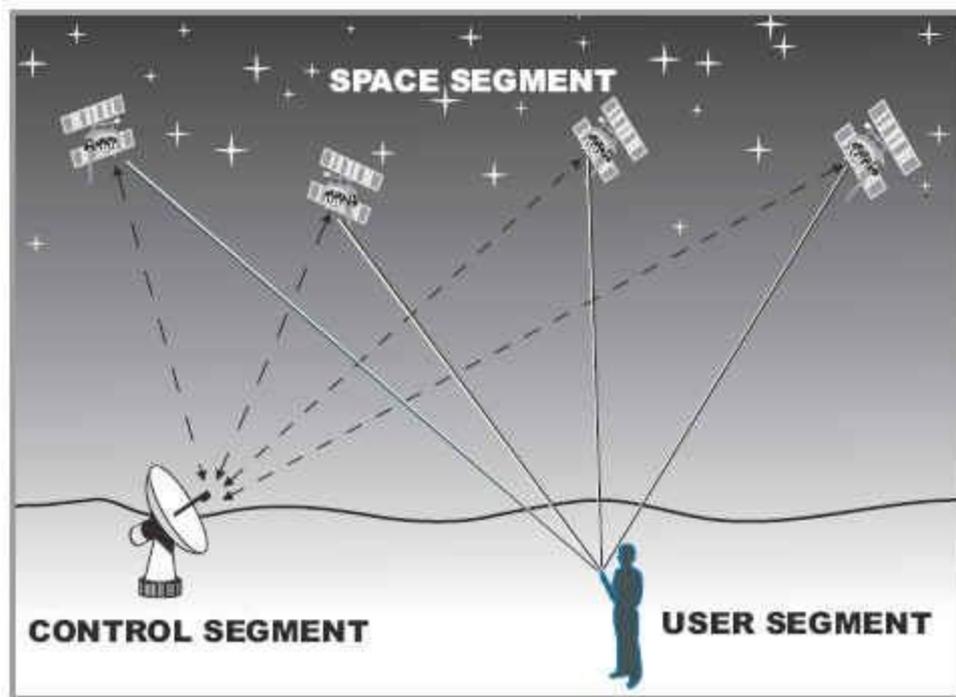


Figure I. 3: Composition du système GPS.

I.3.2. les réseaux terrestre :

❖ Le système LORAN C :

LORAN C est le premier réseau terrestre utilisé pour la localisation. Ce système de navigation a été développé pour fournir un service de radio navigation. LORAN C est basé sur la mesure de la différence de temps d'arrivée des ondes provenant de deux stations terrestres différentes dans les années 1970. Le lieu géométrique représenté par cette différence de temps est une hyperbole (ligne de position (LOP) hyperbolique). Pour fonctionner, il est nécessaire de connaître la position de chacune des stations terrestres qui doit être synchronisées entre elles (référence de temps commune) afin de comparer les instants d'arrivée des différents signaux. Dans le cadre de LORAN, il y a une des stations qui sert de référence à toutes les autres (la station maîtresse, les autres stations sont dites esclaves) [3].

❖ Localisation par GSM :

Le réseau GSM est incontestablement la première norme de téléphonie cellulaire et la référence mondiale pour les systèmes radio mobiles. Cette utilisation étendue du réseau GSM

a permis l'apparition et le développement de différentes solutions de localisation basées sur cette technologie [4].

Un réseau GSM est composé de plusieurs cellules et que chacune d'elle contient une BTS (Base Transcribe Station) qui prend en charge les communications radio des téléphones mobiles. Chaque BTS est relié ensuite à un BSC (Base Station Contrôler) qui pilote l'ensemble des BTS et gère le basculement d'un portable d'une cellule à une autre selon le principe de handover (choisit quelle est la cellule qui prendra en charge le mobile).

La géolocalisation par GSM utilisés par la majorité des gens est basée sur l'IMEI (International Mobile Equipement Identify) obtenu à partir de la carte mère du téléphone, qui est un code unique composé de 15 chiffres. Le numéro IMEI identifie l'appareil (le téléphone en lui-même), tandis que le numéro SIM identifie la carte SIM donc le numéro de téléphone demandé.

Toutes les informations sont contenues dans la carte SIM. Lorsqu'un utilisateur s'identifie à un réseau mobile, son numéro IMEI est transmis au système de gestion de l'opérateur afin de pouvoir l'autoriser à utiliser les différentes options disponible.

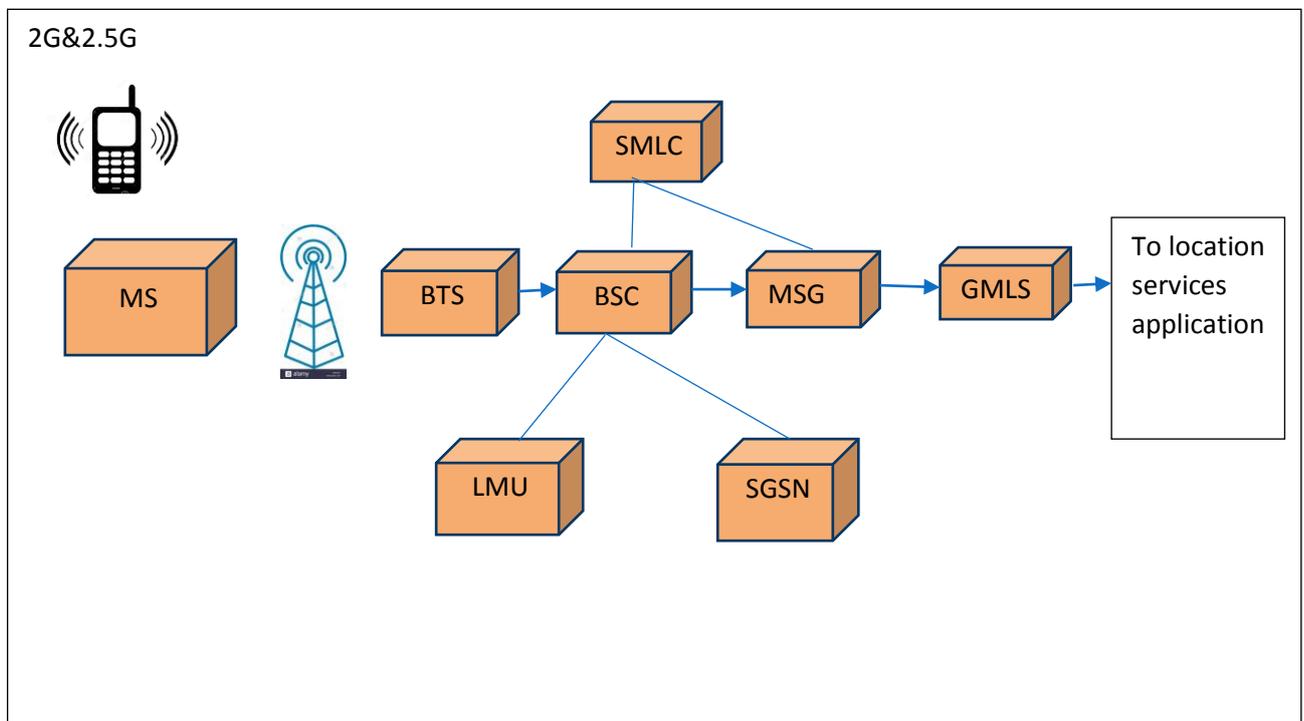


Figure I. 4: Structure du réseau GSM pour les applications de localisation.

I.3.3. Autre système de localisation :

❖ Localisation par WIFI :

Le Wi-Fi (Wireless Fidelity) est une technologie qui permet d'interconnecter un ensemble d'équipements sans fils géré par l'ensemble de normes 802.11 de l'IEEE. Grâce au Wi-Fi, nous sommes capables de créer des réseaux locaux (WLAN) à hauts débits qui interconnectent des ordinateurs de bureaux, des équipements sans fil, des PDA etc. Le système Wi-Fi offre une plateforme sécuritaire munie de techniques de cryptage telles que les clés WEP et WPA. Seuls les équipements autorisés peuvent accéder et échanger des données avec les réseaux d'équipement Wi-Fi [5].

La couverture en milieu fermé est d'une dizaine de mètres (20-50 mètres) et de centaines de mètres en endroits ouverts. Avec l'utilisation d'antennes directionnelles dans un espace ouvert, nous pouvons atteindre plusieurs centaines de mètres de couverture.

De la même façon qu'un terminal GSM peut se localiser par la méthode du Cell ID sur un réseau GSM, un terminal Wifi peut utiliser la même méthode en se basant sur les identifiants des bornes Wifi (Adresses MAC) qu'il détecte. Il existe des bases de données recensant une multitude de bornes d'accès Wifi ainsi que leur position géographique [6].

❖ Localisation par RFID:

La technologie RFID, en anglais «radio-frequency Identification », en français, « Identification par Radio Fréquence » permet l'identification des objets, d'en suivre le cheminement et d'en connaître les caractéristiques à distance grâce à une étiquette émettant des ondes radio, attachée ou incorporée à l'objet. A l'aide de cette technologie, on peut réaliser la lecture des étiquettes même sans ligne de vue directe et le passage par de fines couches de matériaux (peinture, neige, etc.). Ainsi, grâce aux « lecteurs RFID », on peut accéder aux données mémorisées sur des marqueurs appelés « étiquettes radiofréquences » (« RFID tag » ou « RFID transponder» en anglais) [7] .

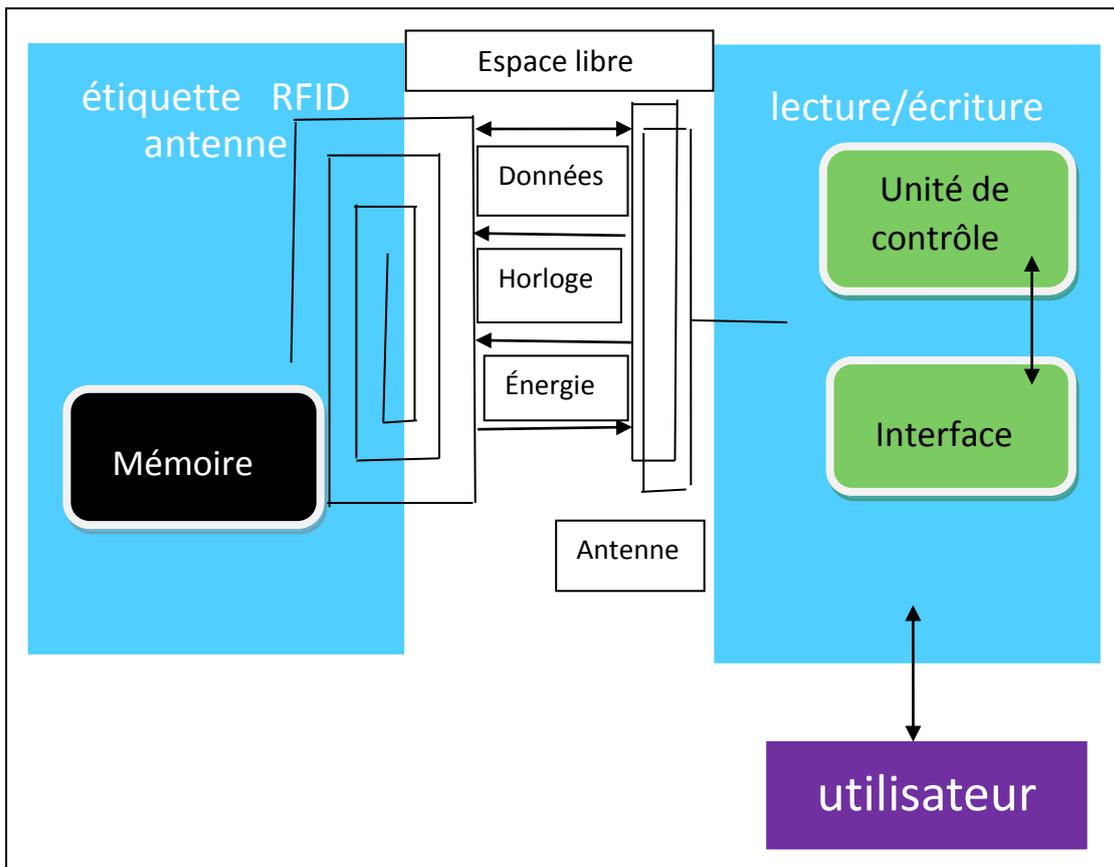


Figure I. 5: Schéma représentatif d'un système RFID.

❖ Localisation par Bluetooth :

Le Bluetooth ou standard IEEE 802.15.1, est un protocole de communication à courte portée de données. Il utilise une technique radio courte distance destinée à simplifier les connexions entre les appareils électroniques. La position d'un appareil mobile à l'aide de cette technologie est considérée comme la même que celle de la cellule individuelle qu'il est en communication avec. L'inconvénient majeur d'un tel système de localisation est que sa précision dépend fortement du nombre de cellules installées et de leurs tailles.

❖ localisation par adresse IP :

Cette méthode permet de déterminer la position géographique d'un ordinateur ou de n'importe quel terminal connecté à internet en se basant sur son adresse IP. Les adresses IP sont gérées par l'IANA, une organisation qui s'occupe de découper les blocs d'adresses IP disponibles et de les distribuer de façon très contrôlée aux pays qui en demandent. Toutes ces

attributions étant très bien documentées, il est possible de savoir dans quel pays se trouve un terminal connecté à internet grâce à son adresse IP. On peut même obtenir un niveau de précision de l'ordre de la ville en se basant sur la distribution des adresses IP faite par les fournisseurs d'accès à internet [6].

❖ Localisation par UWB :

L'Ultra Wide Band (UWB) a été développé en 1960 pour des applications radars utilisant une communication sans fil. C'est une technique de modulation radio qui est basée sur la transmission d'impulsions de très courte durée, souvent inférieure à la nanoseconde.

L'UWB peut être utilisé pour la communication comme il peut être utilisé pour le positionnement de mobiles aussi : les récepteurs, qui sont répartis dans l'environnement, peuvent évaluer la distance des balises UWB, situées sur les mobiles, par mesure du temps de propagation des signaux émis par ces balises, ce qui permet au système de calculer la position des mobiles par Triangulation.

UWB Est une technologie émergente dont les performances, en termes de localisation, semblent prometteuses les techniques temporelles, à savoir TOA (time Of Arrival) et TDOA (Time Différence Of Arrival). L'émission d'impulsions très brèves doit être favorable à la recherche de ce premier trajet correspondant au trajet direct entre un émetteur et un récepteur.

S'il est possible de déterminer précisément l'instant d'arrivée de ce premier trajet, l'application d'un algorithme de Trilatération, permettra d'estimer la position du mobile. Des précisions de l'ordre de quelques centimètres sont attendues de cette nouvelle technologie. [8].

I.4. Les méthodes et techniques de localisation :

I.4.1. Les techniques :

Un résumé des principales techniques de radiolocalisation et leurs principaux avantages et inconvénients est donné dans le Tableau 1 extrait de [9]:

Technique de localisation	Avantages	Inconvénients
Technique basé sur la puissance de signaux reçus (Received Signal Strength, RSS)	<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'implantation peu élevé - Disponibilité des modèles mathématiques d'atténuation - Algorithme de positionnement simple 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'avoir le trajet direct - Précision faible - Performance mauvaise dans un canal ayant un profil de propagation par trajets multiples sévère
Technique basé sur l'angle d'arrivée des signaux reçus (Angle Of Arrival, AOA)	<ul style="list-style-type: none"> - Moins de stations de base fixes nécessaires - Algorithme de positionnement simple 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'avoir le trajet direct - Coût d'implantation élevé - -Précision faible - Performance mauvaise dans un canal ayant un profil de propagation par trajets multiples sévère
Technique basés sur la différence du temps d'arrivée des signaux reçus (Time Of Arrival, TOA)	<ul style="list-style-type: none"> - Paramètres généralement bien estimés - Algorithme de positionnement simple - Précision plus élevée en milieu confiné 	<ul style="list-style-type: none"> - Synchronisation d'horloge nécessaire entre le mobile et les stations de base - Nécessité d'avoir le trajet direct - Nécessité d'une résolution temporelle élevée au récepteur

<p>Technique basé sur la différence du temps d'arrivée des signaux reçue (Time Différence Of Arrival, TDOA)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Paramètres généralement bien estimés - Algorithme de positionnement simple - Précision plus élevée en milieu confiné - Pas besoin de synchronisation d'horloge entre le mobile et les stations de base 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'avoir le trajet direct - Synchronisation d'horloge nécessaire entre les paires de stations de base - Nécessité d'une résolution temporelle élevée au récepteur
---	---	--

Tableau I. 2: Résumé des principales techniques de localisation.

I.4.2. Les méthodes :

I.4.2.1. La triangulation :

L'algorithme de triangulation nécessite pour estimer la position de l'objet mobile, les AOA d'au moins deux sources. Pour deux stations de base Rx1 et Rx2 les angles d'incidence en azimuth des trajets provenant de l'objet mobile, donnés respectivement par α et β , sont représentés en 2D sur la Figure (I.6).

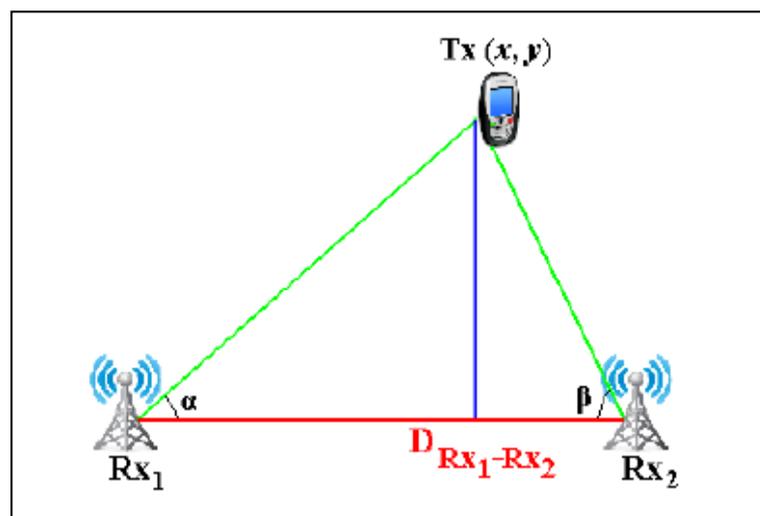


Figure I. 6: Le principe de triangulation [9].

Par construction géométrique, les coordonnées (x , y) de l'objet mobile Tx sont données Par :

$$\begin{cases} x = \frac{\tan(\beta)}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)} D_{Rx_1 - Rx_2} \\ y = \frac{\tan(\alpha) \tan(\beta)}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)} D_{Rx_1 - Rx_2} \end{cases} \dots\dots\dots(I.1)$$

I.4.2.2. La Trilatération :

La Trilatération est une méthode permettant de déterminer une position relative du Tx en utilisant la géométrie des triangles d'une manière similaire à la triangulation. Le procédé implique la connaissance de la distance de l'objet mobile par rapport à un ensemble de références dont les positions sont connues. Trois points de référence sont nécessaires pour déterminer une position 2D. Les coordonnées (x, y) de l'objet mobile Tx exprimées en fonction des distances et des coordonnées connues des points de réception, dans le cas où Rx1 est pris comme origine du système des coordonnées, sont donnés par :

$$\begin{cases} x = \frac{x_2^2 + d_1^2 - d_2^2}{2x_2} \\ y = \frac{x_3^2 + y_3^2 + d_1^2 - d_3^2 - 2xx_3}{2y_3} \end{cases} \dots\dots\dots (I .2)$$

Le procédé est illustré dans la Figure (I.7) ci-dessous :

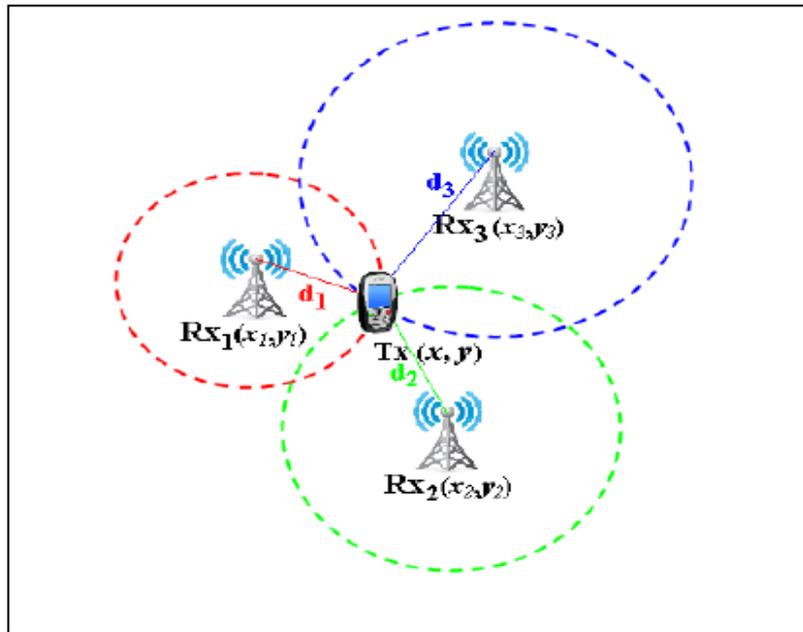


Figure I. 7: Le principe de Trilatération [9].

I.4.2.3. La multilatération :

La multilatération est un procédé basé sur l'intersection des hyperboles dont les équations sont obtenues à partir de TDOA ou PDOA. La position en 2D peut être obtenue en utilisant un minimum de trois récepteurs. L'utilisation des M récepteurs permet d'obtenir les équations de $M - 1$ hyperboles, la position de l'objet étant donnée par le point d'intersection de ces hyperboles.

L'utilisation d'un nombre de récepteurs $M > 4$ conduit à un problème d'optimisation résolu généralement par la méthode des moindres carrés, Ce procédé est illustré dans la Figure (I.8) :

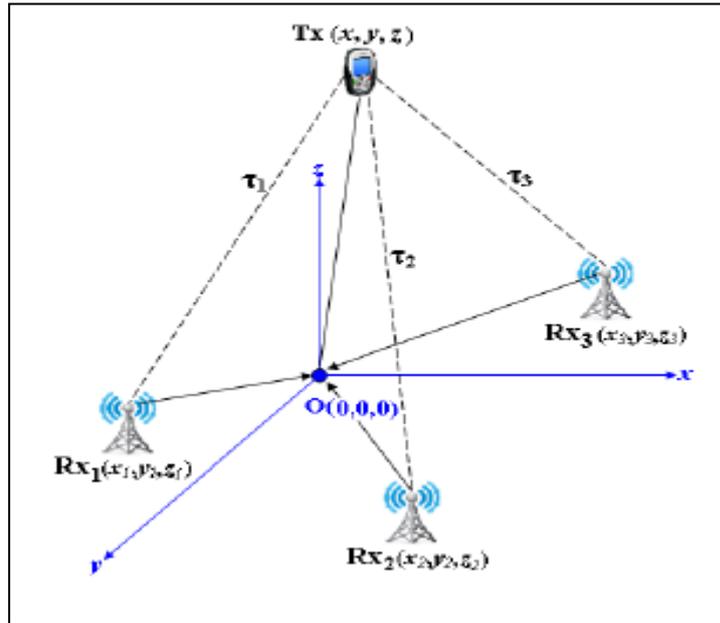


Figure I. 8: Le principe de multilatération [9].

Le système d'équations pour une configuration avec trois récepteurs est basé sur les différences entre les retards mesurés au niveau du chaque récepteur, qui sont exprimées par :

$$\begin{cases} \tau_1 = \frac{1}{c} (\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}) \\ \tau_2 = \frac{1}{c} (\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}) \\ \tau_3 = \frac{1}{c} (\sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2}) \end{cases} \dots\dots\dots(I.3)$$

I.4.3. Les algorithmes de localisation :

Les algorithmes de localisation permettent, à partir d'un ensemble de paramètres, de déterminer la position d'un objet d'intérêt à l'aide de systèmes d'équations (linéaires ou non linéaires) qui lient les paramètres des trajets aux coordonnées spatiales des récepteurs et de l'émetteur ou de vraisemblances avec les éléments d'une base de données.

I.5. Les source d'erreur dans les systèmes localisation :

Une mauvaise précision d'un système de localisation est le résultat d'erreurs des observables mesurées par rapport aux valeurs exactes qui devraient être obtenues. Ces erreurs proviennent de diverses sources. En général, les sources d'erreur des systèmes de géolocalisation peuvent être résumées par [5] :

- l'horloge : l'éternel problème de synchronisation. L'instabilité et la mauvaise précision des horloges dans les systèmes de positionnement entraînent directement des erreurs dans les mesures faites. Bien qu'il existe des mécanismes de synchronisation de l'horloge et des modèles mathématiques pour corriger ces erreurs, il reste toujours une certaine erreur. Les horloges sont une source d'erreur pour toutes les méthodes de positionnement où les distances et les différences de distance sont déterminées par des mesures de temps.
- la réfraction ionosphérique et troposphérique : La réfraction dans l'atmosphère terrestre est responsable de petites déviations de la vitesse des signaux par rapport à la vitesse de la lumière. Les réfractions ionosphérique et troposphérique ont une importance particulière dans les systèmes satellitaires.
- Non visibilité directe (NLOS) : Lorsqu'il y a une vue directe (LOS) entre la station émettrice et la station réceptrice, on peut supposer que le premier signal a emprunté une voie directe, et les autres signaux sont considérés comme des trajets réfléchis. Toutefois, dans certains cas, le LOS n'existe pas, donc tous les signaux reçus sont des trajets réfléchis, ce qui peut conduire à des retards et des erreurs de mesure des observables. Ce problème est particulier aux systèmes de positionnement en fonction du temps comme les systèmes cellulaires, et n'est responsable que de précision modérée par rapport aux GPS (qui exige toujours le LOS). Le NLOS entraîne également d'importantes erreurs dans les systèmes utilisant l'AOA, car un signal réfléchi peut arriver à partir d'une direction quelconque de la station de base émettrice.
- les trajets multiples : À la suite de la propagation par trajets multiples, les différents signaux peuvent se superposer au niveau du récepteur et fausser l'amplitude et la phase du signal émis. Il s'agit d'un problème particulier si les intervalles sont déterminés par les mesures de RSS ou par des mesures de phase.

- le support d'accès : Le positionnement dans les systèmes intégrés souffre souvent d'interfaces qui ont été conçues pour la communication. Ces systèmes intégrés présentent donc des carences lors de leur utilisation pour le positionnement.
- les coordonnées des stations de base : Une autre source potentielle d'erreur sur les résultats peut provenir de l'inexactitude des coordonnées des stations de base.

Dans les systèmes indoor et cellulaires, ce risque peut être évité car les positions des stations sont fixes. Par contre, les satellites sont soumis aux forces gravitationnelles lors de leur mouvement orbital, qui sont le résultat de la forme non sphérique de la terre, de la gravitation externe, les vents solaires, . . . Ainsi, la véritable position du satellite s'écarte toujours un peu de sa position utilisée lors du calcul de la position et provoque ainsi des dégradations de précision.

- la mauvaise configuration géométrique : Une mauvaise géométrie est donnée si les stations de base sont disposées le long d'une ligne, par exemple, sur les autoroutes, ou si elles sont disposées très proches les unes des autres. En conséquence, les différents trajets arrivent au terminal à des angles très peu profonds, ce qui augmente le niveau d'erreur. En règle générale, une bonne géométrie est donnée si ces angles sont presque droits.

I.6. NLOS :

Dans une communication radio, nous retrouvons deux notions, le LOS (signal à vue) et le NLOS (sans ligne de vue).

Si une liaison LOS (directe) ne rencontre aucun obstacle entre l'émetteur au récepteur, la zone de Fresnel est libre. Si ce critère n'est pas respecté alors il ya une réduction significative de la force du signal. La zone de Fresnel dépend de la fréquence de fonctionnement et la distance entre les lieux émetteurs et le récepteur.

Dans un lien NLOS, un signal atteint le récepteur au travers de réflexions et de diffractions. Les signaux arrivant au récepteur sont constitué de plusieurs composantes du signal original. Ce sont des reflets de plusieurs chemins, de l'énergie dispersée, et de voies de propagation diffractée. Ces signaux engendrent un retard, une atténuation et une déformation par rapport à un trajet direct.

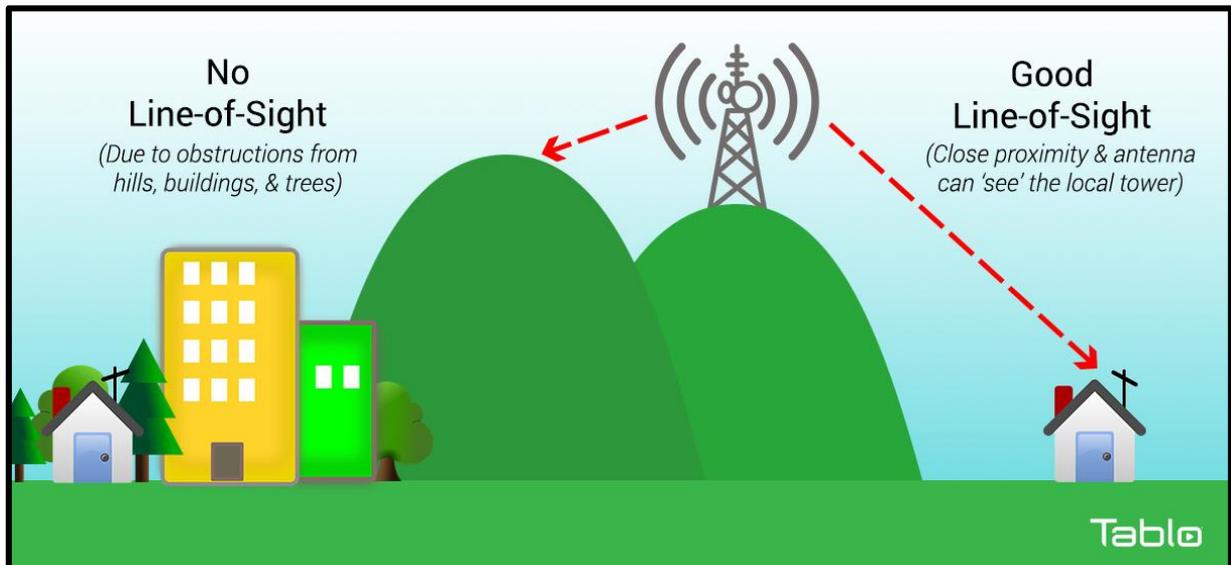


Figure I. 9 : NLOS

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté des généralités sur les systèmes de localisation, ainsi que leur environnement d'utilisation, et les différentes techniques et méthodes déployées dans les systèmes de localisation. La section suivante sera consacrée aux systèmes de localisation via le RSS.

Chapitre II

Matériel et logiciel à mettre en œuvre

II. Matériel et logiciel à mettre en œuvre

II.1. Introduction :

La localisation fait usage des plusieurs technologies différentes, qui sont basés sur des méthodes (trilateration, lateration ...) et techniques (TDOA, AOA, TOA et RSS).

Dans la partie qui suit, on s'intéressé à la localisation par mesure RSS, et à la technologie ZigBee et d'autre périphériques de communication, dont on va utiliser dans les mesures de puissance reçus.

II.2. Indicateur de puissance du signal reçu :

La technique de localisation basée sur le RSS utilise la puissance du signal reçu, afin d'estimer la distance entre l'émetteur et le récepteur, d'où plusieurs paramètres qui peuvent être à l'écoute afin d'adapter a presque tous les environnements d'où le calcul du RSSI peut être calculé sous la forme :

$$RSSI=10 n \log(d) +A \quad \dots\dots\dots (II.1)$$

D'où

n=l'exposant de pertes du parcours

d=distance de transmission

A=valeur de référence qui est la valeur du RSSI a 1 m de l'émetteur

L'équation précédente peut être écrite a fin de représenté la distance :

$$d = 10^{\frac{RSSI-A}{10n}} \quad \dots\dots\dots (II.2)$$

L'exposant n peut être calculé pour chaque environnement en enregistrant les valeurs RSSI à des distances connues :

Espace libre	2
Los	1.6à1.8
Radio cellulaire en zone urbaine	2.7à3.5
Radio cellulaire urbaine ombragée	3à5
En construction ligne de mire	1.6à1.8
Obstrué dans le bâtiment	4à6
Obstrué dans les usines	2à3

Tableau II. 1 : Valeur d'exposant n.

IL existe d'outre modèle de calcul de la puissance reçue tel que la formule de (II.3) :

$$\frac{p_r}{p_t} = G_r \cdot G_t \cdot PLF \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (II.3)$$

Où

Pt : puissance de signal émis.

Pr : puissance de signal reçu.

Gt : gain de l'émetteur.

Gr : gain de récepteur.

d : distance entre les deux antennes.

PLF : polarisation loss factor (qui quantifie les pertes par rapport au non alignement de polarisation de deux antennes).

La technique de localisation basé sur le RSS utilise la puissance du signal reçu par les récepteurs pour estimer la distance entre l'émetteur et les récepteurs.

La méthode de RSS est très utilisée dans les systèmes de localisation urbain, rural, d'autres modèles plus complexes existent. En général, chaque modèle est conçu pour un environnement et un système de géolocalisation bien définie.

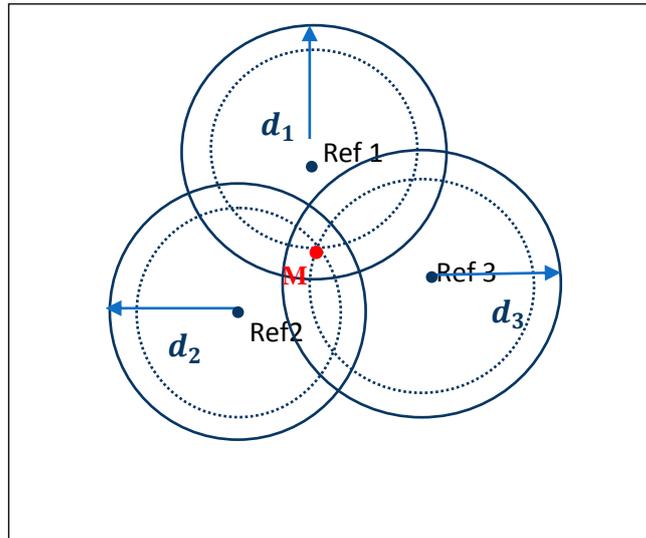


Figure II. 1 : Trilatération à partir de trois mesures RSS.

L'inconvénient principal de l'utilisation du RSS est l'imprécision de la localisation en présence de multi-trajets dans l'environnement. Dans le cas de la géolocalisation indoor, il faut estimer les perturbations liées aux obstacles comme les murs, cloisons, vitres, équipements électromagnétiques...etc. Quand l'application est à l'extérieur les perturbations sont moindres et le calcul de l'atténuation est simplifié. Par conséquent, les algorithmes de positionnement basés sur le RSS sont sensibles à l'estimation des paramètres de l'environnement.

Généralement, quel que soit le type de localisation souhaité, la position est déterminée à partir d'une ou plusieurs observables, qui compose d'une méthode de positionnement, un système de référence (descriptive, en réseau ou spatiale), une infrastructure et des protocoles pour la coordination du processus de positionnement.

II.3. Problème de puissance du signal :

En transmission sans fil, le signal subit des dégradations de puissance, due aux obstacles, et en raison de la propagation, le signal s'efface ou perd sa puissance d'émission principale. Le canal radio limite sérieusement les performances du système sans fil, comme changer le chemin de transmission de Line-Of-Sight (LOS) à complètement obstrué par des obstacles tels que des bâtiments, des collines, ... etc.

D'où la puissance du signal reçu peut être calculée sous la forme [10] :

$$Pr(d) = Pt \cdot Gt \cdot Gr \cdot \lambda / (4\pi) \cdot dL \quad \dots\dots\dots (II.4)$$

Où :

Pt : puissance transmise

Pr : puissance reçue

Gt : gain de l'antenne transmise

Gr : gain de l'antenne reçue

d : séparation Tx-Rx

λ : c / f - longueur d'onde

L : autres pertes matérielles ($L \geq 1$)

Les facteurs qui affectent la puissance du signal, généralement appelée atténuation. Nous pouvons dire que dans une propagation à grande échelle, les modèles de perte d'affinité et d'affaiblissement de l'ombre peuvent être efficaces dans les canaux sans fil sur le terrain.

II.3.1. Récapitulatif des effets de la propagation sur la localisation basée en RSSI :

Les perturbations ou les atténuations qui affectent la propagation dans un environnement réel sont au nombre de trois : atténuation de l'espace, effet de masquage et évanouissement. Ces trois phénomènes sont représentés sur la Figure II 2. L'atténuation de l'espace est utilisée Comme base de la méthode de localisation RSSI, mais les autres effets constituent des contraintes vis-à-vis de cette méthode [11].

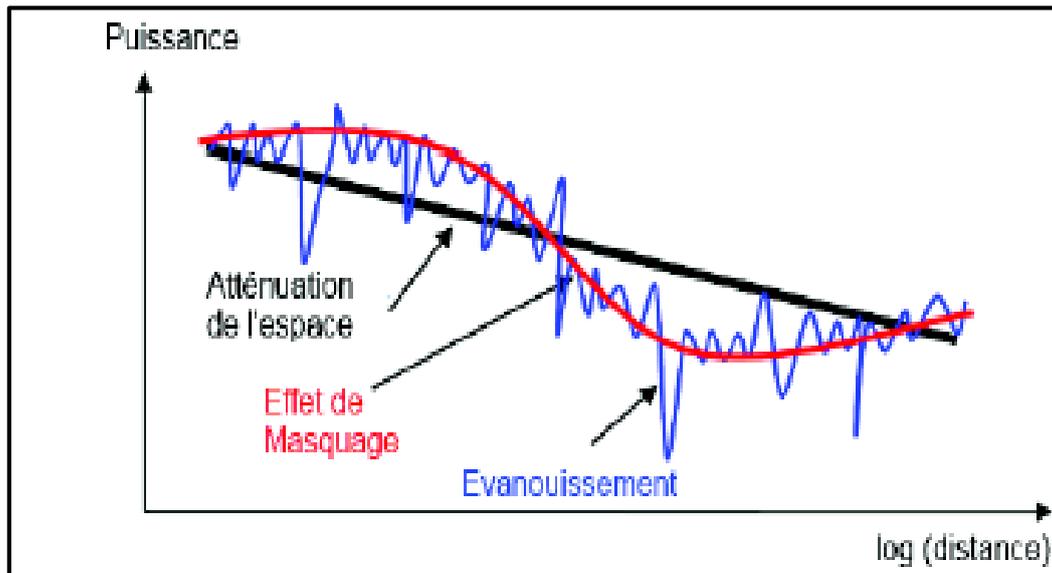


Figure II. 2 : Effets du canal de propagation.

D'autres perturbations existent, tel que les multi-trajets qui ont beaucoup d'influence sur les mesures de puissance, et peuvent augmenter considérablement l'erreur de l'estimation de la distance.

II.4. Le standard 802.15.4 :

C'est un standard destiné aux réseaux sans fil de la famille des LR WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network), du fait de leur faible consommation, de leur faible portée et du faible débit des dispositifs utilisant ce protocole. En générale cette norme est utilisé par les réseaux pour transporter essentiellement les commandes et non des données [12].

II.4.1. La norme ZigBee :

ZigBee est un standard industriel pour faire face aux restrictions de WSN. ZigBee Alliance propose une norme basée sur un coût très faible, une faible consommation énergétique et une connexion sans fil bidirectionnelle communications. L'architecture de pile ZigBee est composée d'un ensemble de blocs appelés couches, comme décrit dans figure II.3 [13].

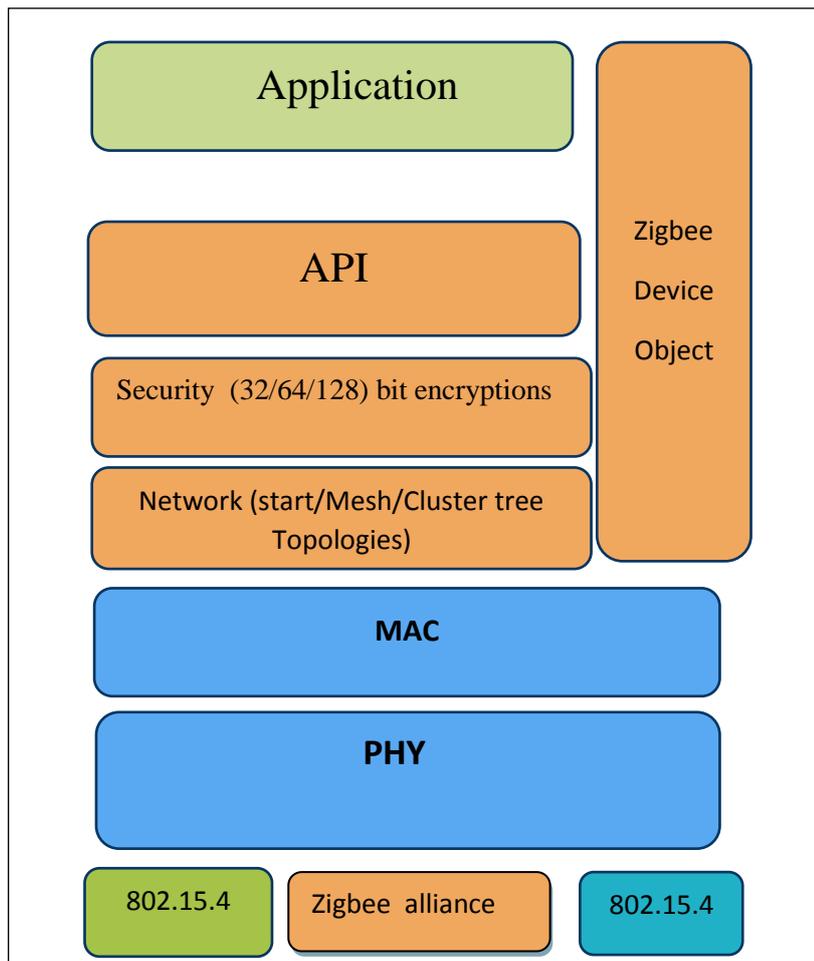


Figure II. 3 : Architecture ZigBee.

Compte tenu des spécifications IEEE 802.15.4 sur les couches PHY et MAC, le ZigBee Alliance définit la couche réseau et le cadre de la couche application.

Les spécifications ZigBee définissent une topologie arborescente activée par les balises, en tant que cas particulier le réseau peer-to-peer, Cette topologie consiste en un périphérique racine qui est le coordinateur PAN (master) et les nœuds. Les nœuds sont divisés en deux catégories :

Les routeurs et les Périphérique. Routeurs doivent être des FFD ; ils reçoivent les données des sources, les agrègent et transmettent le paquet obtenu à leurs destinations. Les périphériques peuvent être des FFD ou des RFD, elles doivent seulement transmettre paquets à leur master.

- **Coordinateur** : les réseaux ZigBee ont toujours un seul dispositif de coordination pour former le réseau, distribuer l'adresse, sécuriser le réseau et le maintenir en bonne santé.
- **Routeur** : est un nœud ZigBee complet. Il peut rejoindre des réseaux existants, envoyer informations, recevoir des informations et des informations d'itinéraire. Les routeurs sont généralement branchés dans une prise électrique, car ils doivent être allumés tout le temps.
- **Périphérique final** : Un périphérique final a toujours besoin d'un routeur ou d'un coordinateur pour être son périphérique parent.

❖ Modes de fonctionnement ZigBee :

Généralement il existe deux modes de fonctionnement de ces modules :

- Un fonctionnement "transparent" : les données sont directement envoyées/reçues par le module. La configuration du module s'effectue par le biais de commande "AT".
- Un fonctionnement "direct" ou "API" : il faut fabriquer ces propres trames et les envoyer au module. Ce mode est plus puissant et rapide mais nécessite plus de programmation et un firmware de type "API".

I.4.2. Le module XBee :

XBee est une marque de radio prenant en charge divers protocoles de communication. XBee est un module RF riche en fonctionnalités qui en fait une très bonne solution pour les concepteurs WSN ; le protocole mis en œuvre sur les modules tels qu'IEEE 802.15.4 et ZigBee peuvent considérablement réduire le travail du programmeur pour assurer la communication des données. Ainsi que capacité à communiquer avec un Microcontrôleur via une connexion série, il dispose également de broches supplémentaires pouvant servir à une autonome application [12].

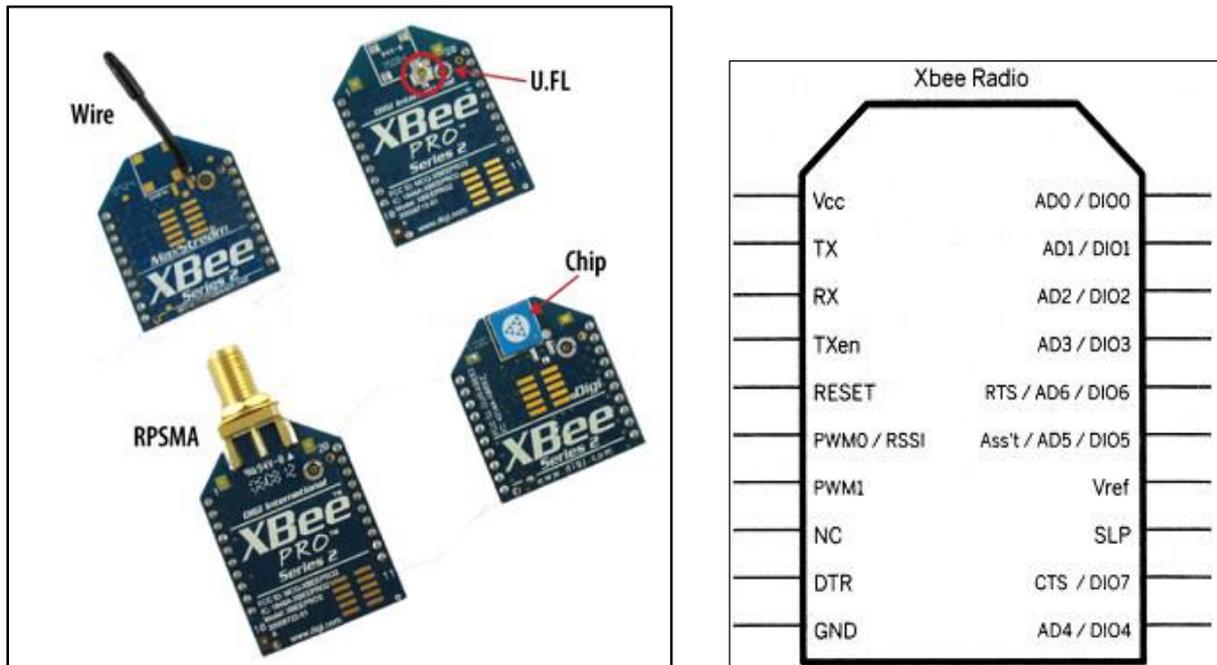


Figure II. 4: Model et architecture principale du module XBee [14].

Les modules XBee possèdent des broches d’entrée / sortie numériques qui peuvent être utilisées pour la lecture des états de capteurs ou l’envoi de commandes, et des broches analogiques.

Une caractéristique importante est la ligne passant, où une entrée numérique sur un XBee peut être reflétée sur la sortie numérique de un autre, contrôlant ainsi la sortie du second module.

II.4.2.1. Caractéristiques du module ZigBee de Digi :

Le tableau qui suit représente les principales caractéristiques du module XBee 3 de Digi [15] :

Spécification	Digi Xbee
Transceiver chipset	Silicon Labs EFR32MG SoC
Débit de données	RF 250 Kbps, série jusqu'à 1 Mbps
Gamme intérieure / urbaine	Jusqu'à 60 m
Gamme de ligne de visée extérieure / RF	Jusqu'à 1200 m
Puissance de transmission	+8 dBm
Sensibilité du récepteur (1% PER)	-103 dBm Mode Normal
Bande de fréquence	ISM 2,4 GHz
Immunité d'interférence	DSSS (étalement de spectre à séquence directe)
Température de fonctionnement	-40° C à + 85° C
Dimensions	2,438 x 2,761 cm
Mémoire	1 Mo / 128 Ko de RAM (32 Ko sont disponibles pour Micro Python)
Vitesse CPU/Horloge	HCS08 / jusqu'à 50,33 MHz
Protocol	Zigbee 3.0
Cryptage	AES 128/256 bits
livraison de paquets fiable	Retries/Acknowledgements
Canaux	16 canaux
Exigences de puissance	Tension d'alimentation 2.1 à 3.6v
Courant de transmission/ recevoir	40 mA pour 8 dBm/ 17Ma

Tableau II. 2 : Caractéristiques du module ZigBee 3 de digi.

II.4.2.2. XBee Adressages et canaux :

Chaque paquet de données RF envoyé par voie hertzienne contient une adresse source et une adresse destination, qui est inclus dans l'en-tête. Les modules XBee ont une adresse unique et permanente sur masse, cette adresse est un numéro de série 64 bits attribué par le fabricant.

Les modules ont également une adresse courte de 16 bits attribuée par le réseau. Le tableau qui suit représente chaque le type d'adresses :

Type	Exemple	Unique
64-bit	0013A200403E0750	Oui, sur terre
16-bit	23F7	oui, seulement dans un réseau

Tableau II. 3 : Type d'adressage en norme ZigBee.

L'adresse abrégée de 16 bits d'un nœud est attribuée par un coordinateur ou un routeur au module pour rejoindre le réseau, qui représente aussi l'adresse réseau, l'adresse 0x0000 est réservée au coordinateur. Cette façon de résolution de l'identité d'un nœud d'un réseau ne peut pas être fiable car l'adresse 16 bits n'est pas statique. Pour résoudre ce problème, l'adresse de destination de 64 bits est souvent incluse dans les données de transmissions pour garantir que les données sont livrées à la bonne destination. Si deux modules prennent en charge le même type d'adresses, la configuration des adresses des nœuds du réseau sont différent [16].

- **Adresse PAN :** Il s'agit d'une autre adresse 16 bits pertinente pour le réseau personnel, l'adresse PAN 16 bits offre la possibilité de 65 536 adresses PAN différentes avec 65 536 adresses de module 16 bits pour chaque PAN. Ce schéma d'adressage donne la capacité pour plus de 4 milliards de radios au total [17].
- **Canaux :** en supposant que tout l'adressage soit correct dans le réseau, la communication ne peuvent toujours pas être établie à moins que les modules fonctionnent sur la même fréquence. Ainsi, tous Les modules du réseau doivent utiliser le même canal. Généralement 12 canaux, ou plus basés sur le type de radio, sont disponibles, mais le programmeur n'a pas à s'inquiéter de en sélectionnant un canal spécifique puisque les modules XBee le sélectionnent automatiquement.

Les modules XBee ZigBee prend en charge la topologie maillée ; dans ce cas, les adresses des nœuds qui souhaitent rejoindre ou quitter le réseau sont attribuées par le coordinateur, ils sont donc affectés dynamiquement. On outre XBee IEEE 802.15.4 prend en charge fondamentalement le réseau d'égal à égal dans lequel l'adresse est configurée manuellement.

II.4.3. Logiciel xctu :

Le logiciel xctu est une application multi plate-forme, conçue pour permettre aux développeurs d'interagir avec les modules Digi RF (XBee par exemple), via une interface graphique simple à utiliser. Il comprend des outils qui facilitent la configuration et le test des modules XBee, et des fonctionnalités uniques telles que la vue graphique du réseau, qui représente graphiquement le réseau XBee ainsi que la puissance du signal de chaque connexion, et le générateur de trames API XBee, qui aide intuitivement à construire et à interpréter les trames API pour XBee utilisé en mode API [18].

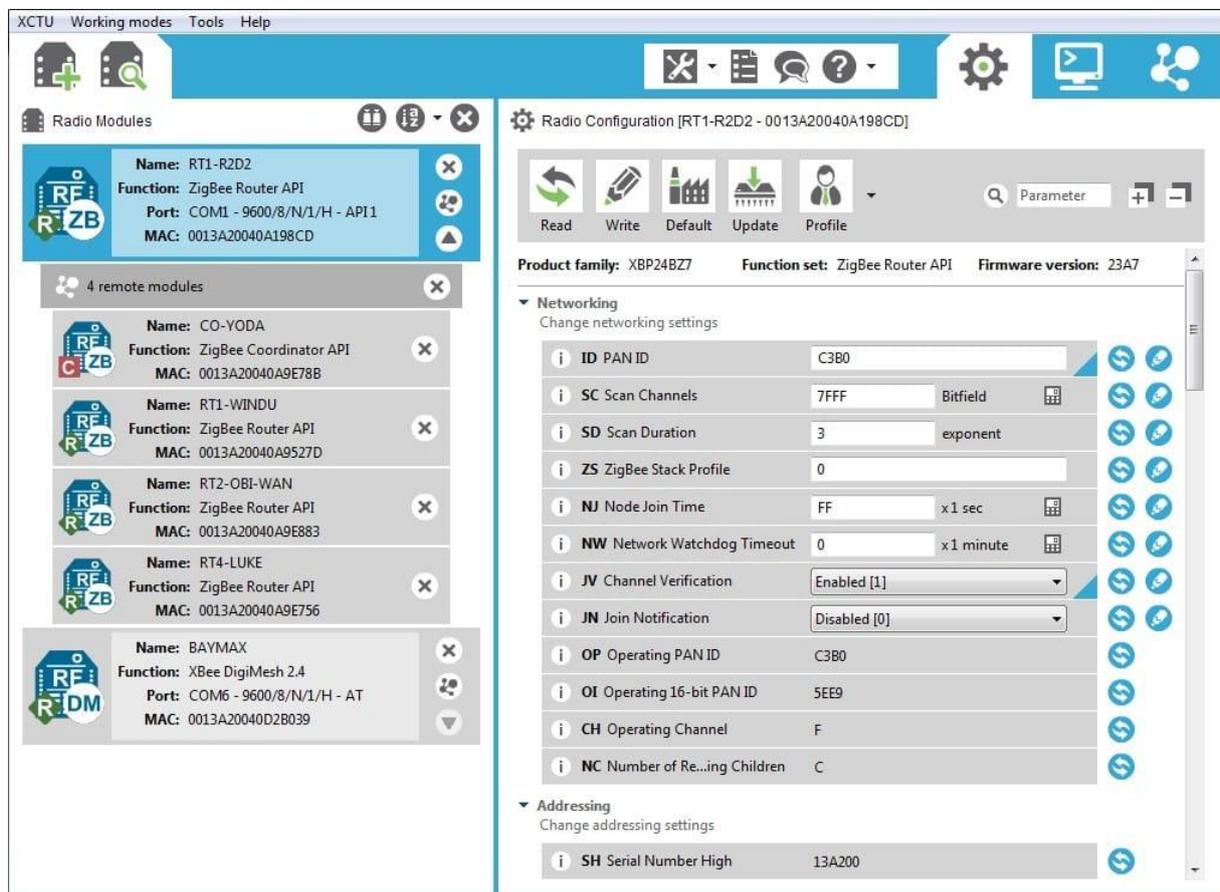


Figure II. 5 : Interface principal du logiciel Xctu.

Les autres fonctionnalités de XCTU incluent les fonctionnalités suivantes :

- gérer et configurer plusieurs périphériques RF, même des périphériques connectés à distance (par liaison radio).
- la gestion automatique des modifications du mode et de la vitesse de transmission.

- enregistrer les sessions de console et les charger sur un autre ordinateur exécutant XCTU.
- Générez facilement tout type de cadre API pour enregistrer sa valeur.
- Décode une trame API et affiche ses valeurs de trame spécifiques.
- Récupération : Récupérez les modules radio dont le micro logiciel est endommagé ou en mode de programmation.
- Effectuez un test de portée entre 2 modules radio du même réseau.

II.5. Arduino :

Arduino est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation.

Sans tout connaître ni tout comprendre de l'électronique, cet environnement matériel et logiciel permet à l'utilisateur de formuler ses projets par l'expérimentation directe avec l'aide de nombreuses ressources disponibles. Pont tendu entre le monde réel et le monde numérique, sachant qu'arduino est un projet open-source [19].

II.5.1. Le Matériel arduino :

La carte Arduino base sur un circuit intégré (microcontrôleur), implémenté sur une carte électronique, associée à des CNA/CAN, communication série, et des entrées/sorties qui permettent à l'utilisateur de brancher différents types d'éléments externes :

- ✓ Côté entrées, des capteurs qui collectent des informations sur leur environnement
Comme la variation de température via une sonde thermique, le mouvement via un détecteur de présence ou un accéléromètre, le contact via un bouton-poussoir, etc.
- ✓ sorties, des actionneurs qui agissent sur le monde physique telle une petite lampe, moteur, etc.

Comme le logiciel Arduino, le circuit électronique de cette plaquette est libre, et ses plans sont disponibles .Il existe plusieurs variétés de cartes Arduino. La figure II.6 représente l'arduino Uno.

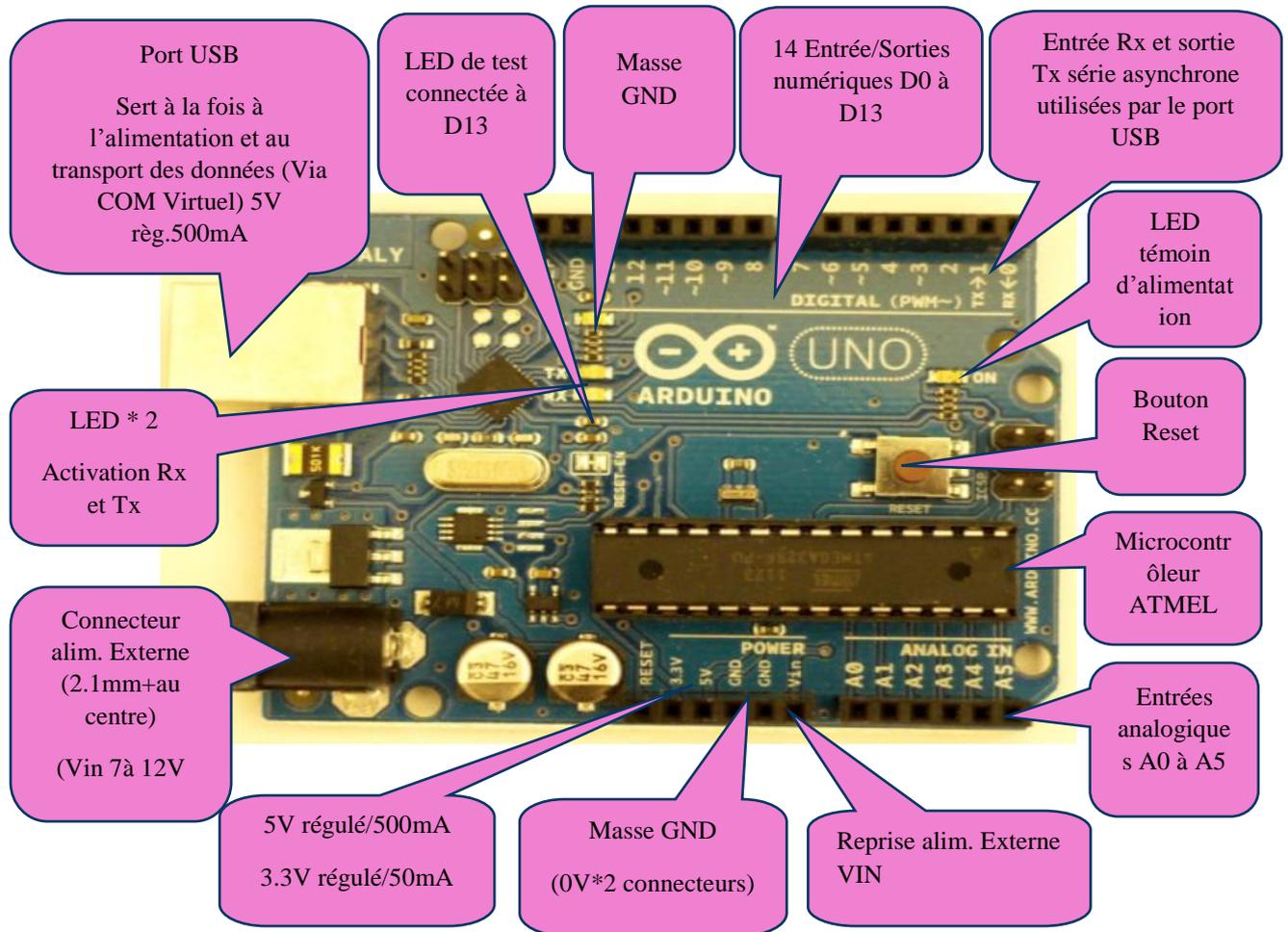


Figure II. 6 : Carte arduino UNO [20].

Alimentation :

La carte Arduino peut-être alimentée soit via la connexion USB (qui fournit 5V jusqu'à 500mA) ou à l'aide d'une alimentation externe. La source d'alimentation est sélectionnée automatiquement par la carte.

Communication :

La carte Arduino Uno dispose de toute une série de facilités pour communiquer avec un ordinateur, une autre carte Arduino, ou avec d'autres microcontrôleurs. L'ATmega 328 dispose d'une UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter ou émetteur-récepteur asynchrone universel en français) pour communication série de niveau TTL (5V), et qui est disponible sur les broches 0 (RX) et 1 (TX). D'autre part un circuit intégré ATmega8U2 sur la

carte assure la connexion entre cette communication série vers le port USB de l'ordinateur et apparaît comme un port COM virtuel pour les logiciels de l'ordinateur.

Cette carte électronique peut être autonome et fonctionner sans ordinateur ou servir d'interface avec celui-ci, dans le présent mémoire c'est le model Méga qui nous utiliseront dans travail pratique.

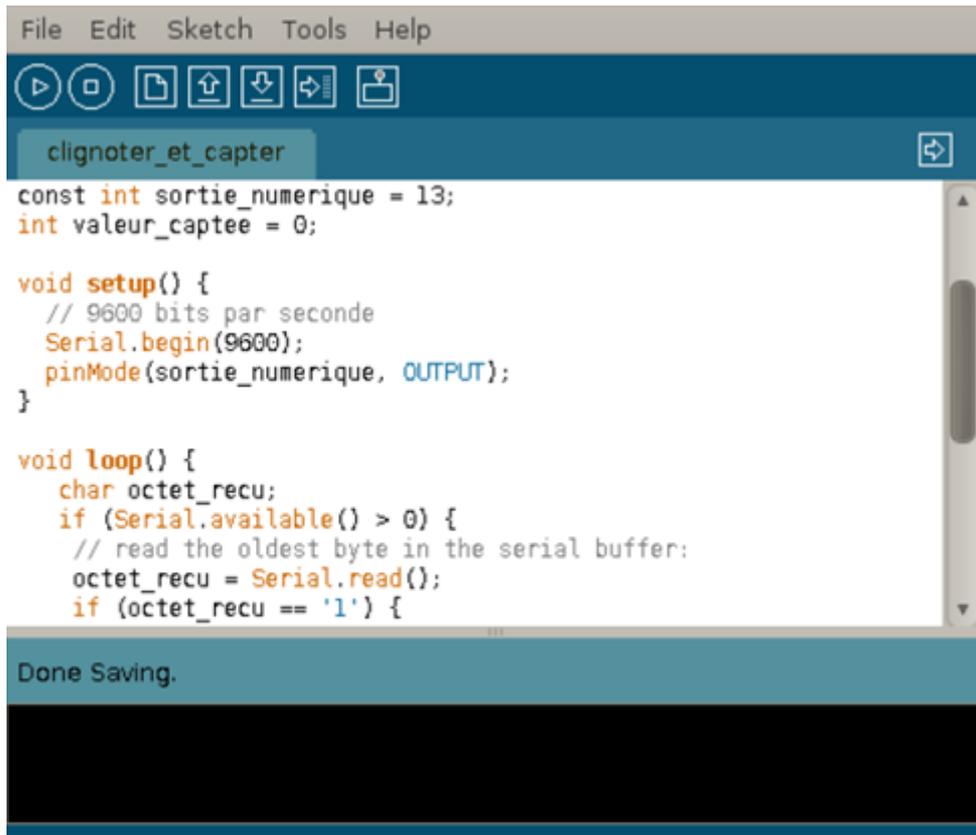
Les avantages :

- ✓ Pas cher.
- ✓ Environnement de programmation clair et simple.
- ✓ Multiplateforme : tourne sous Windows, Macintosh et Linux.
- ✓ Nombreuses bibliothèques disponibles avec diverses fonctions implémentées.
- ✓ Logiciel et matériel open source et extensible.
- ✓ Nombreux conseils, tutoriaux et exemples en ligne (forums, site perso etc...)
- ✓ Existence de « shield » (boucliers en français) : ce sont des cartes supplémentaires qui se connectent sur le module Arduino pour augmenter les possibilités comme par exemple : afficheur graphique couleur, XBEE, GPS, etc....

Par sa simplicité d'utilisation, Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications comme l'électronique industrielle et embarquée...

II.5.2. Le logiciel arduino :

L'environnement de programmation Arduino (IDE) est une application écrite en Java inspirée du langage Processing. L'IDE permet d'écrire, de modifier un programme et de le convertir en une série d'instructions compréhensibles pour la carte [13].



```
File Edit Sketch Tools Help
clicnoter_et_capter
const int sortie_numerique = 13;
int valeur_captee = 0;

void setup() {
  // 9600 bits par seconde
  Serial.begin(9600);
  pinMode(sortie_numerique, OUTPUT);
}

void loop() {
  char octet_recu;
  if (Serial.available() > 0) {
    // read the oldest byte in the serial buffer:
    octet_recu = Serial.read();
    if (octet_recu == '1') {
```

Done Saving.

Figure II. 7 : L'environnement de de programmation arduino [21].

II.6. Conclusion :

Dans le présent chapitre, nous avons présenté la norme ZigBee et le module XBEE de digi, ainsi que le module arduino, dont il capable de mesurer la puissance du signal reçu, les précédents modules seront utilisés dans la partie qui suit afin d'obtenir les mesure RSS.

Chapitre III

Mesures pratiques

III. Mesures pratiques

III.1. Introduction :

Le présent chapitre est consacré à l'étude expérimentale des performances d'un système de localisation basé sur les mesures de la puissance du signal, transmis à partir d'un terminal ZigBee.

Dans un premier temps, nous décrivons les différents éléments utilisés lors de nos mesures expérimentaux : Arduino, module ZigBee, et les coordinateurs ZigBee. Nous présentons dans un second temps, notre système de communication et de mesure, les paramétrages, et les différents résultats des tests effectués, ainsi que l'erreur de mesure.

III.2. Description du schéma pratique :

L'objectif de notre montage est l'établissement d'une communication (émission, réception) entre deux terminaux ZigBee, afin de mesurer la puissance du signal reçu par l'une des entités, en faisant appelle certains éléments électronique, et un ordinateur pour piloter le tout.

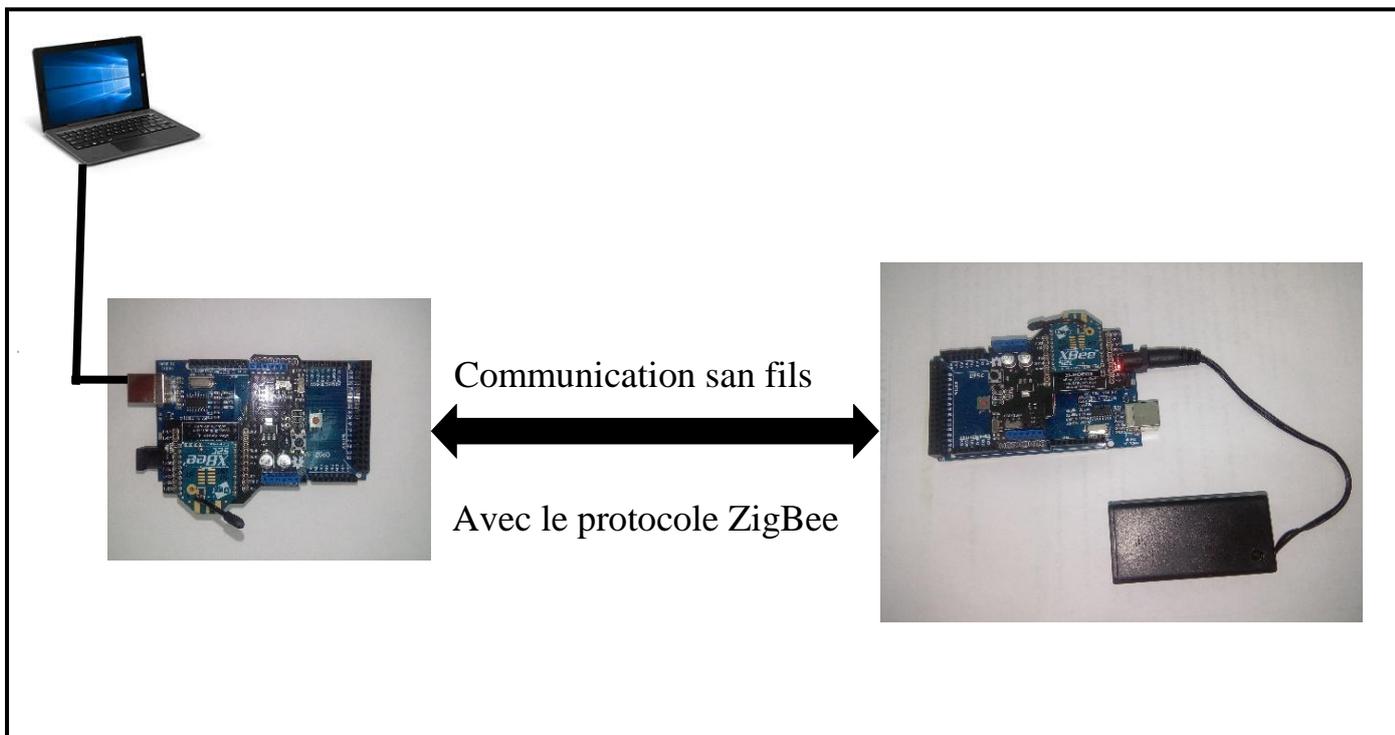
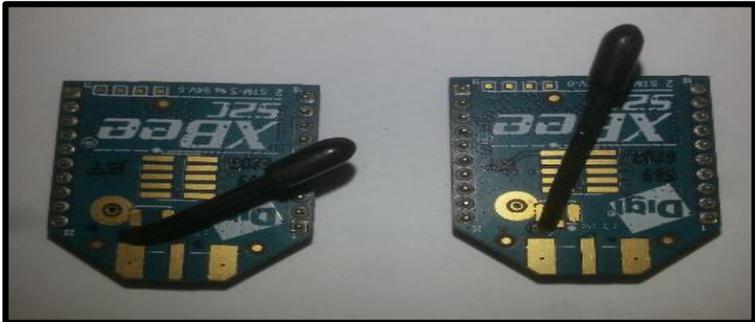


Figure III. 1 : Schémas de principe du montage utilisé.

III.2.1. Matériels utilisés :

<p>Deux cartes Arduino méga</p>	
<p>Deux Shields XBee (DFR0015)</p>	
<p>Deux modules XBee (S2C)</p>	

<p>Fils de branchement</p>	
<p>Câble USB</p>	
<p>PC portables</p>	
<p>Batterie 5 Volts</p>	

Tableau III. 1 : Matériels utilisés dans la chaîne de transmission.

III.2.2. Description du montage :

Le montage pratique utilisé pour mesurer une distance entre un émetteur et un récepteur peut être découpé en deux parties, partie fixe et partie mobile. La description de ces deux parties est comme suite :

a- La partie mobile :

- Alimentation de la carte Arduino par une tension de 5V continue.
- la carte Arduino contient un programme assurant la transmission du message '**Bonjour**' vers le module XBee (configuré comme routeur) via une communication série (RS 232), à un rythme de 0.5 second.
- Le module XBee analyse le message reçu et le transmet via son antenne vers le module XBee de la partie fixe.

b- La partie Fixe :

- Le module XBee (configuré comme coordinateur) reçoit le message transmis par le module XBee de la partie mobile. Ce message transmis chaque 0.5 second assure la communication continue entre les deux modules XBee.
- La carte Arduino contient un programme assure la transmission de la commande API 'DB' sous forme d'un message vers le module XBee toujours via une communication série.
- Dès que le module XBee reçoit sur son port série la commande API 'DB', il va répondre sur le même port par un message contenant la valeur de la puissance du signal reçu (RSS) sur son antenne.
- La carte Arduino reçoit le message qui contient le RSS sur son premier port série. Ce même message sera acheminé sur son deuxième port série. Ce dernier est connecté via un câble USB sur un port USB (configuré pour assurer une communication série) d'un PC.
- Le PC dispose du logiciel MATLAB version 2014b. Un programme sous MATLAB assure la lecture du port de communication de la carte Arduino et le sauvegarde des valeurs du RSS récupérées sur ce port.

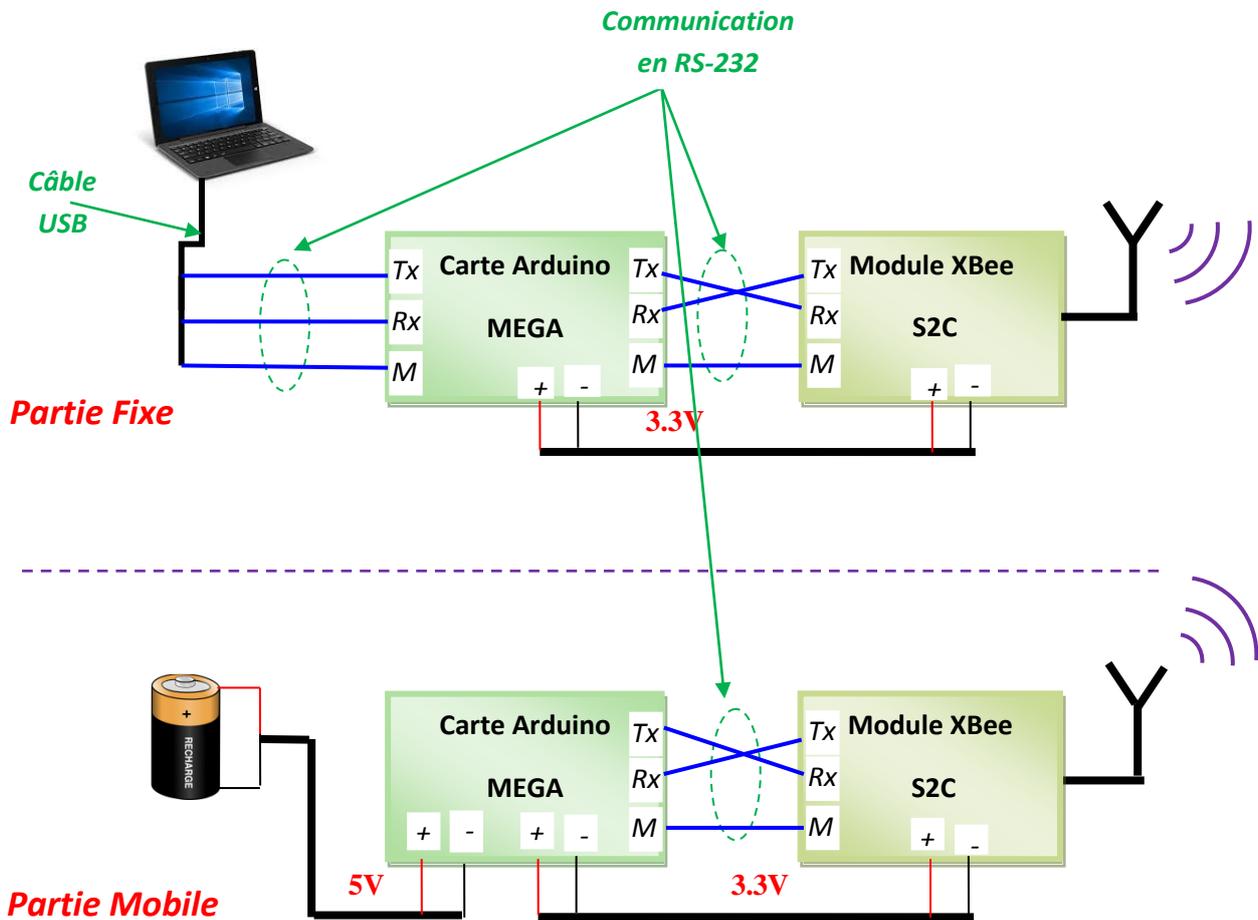


Figure III. 2 : Schéma électrique du montage pratique.

III.2.3. Configuration du XBee :

On branche notre XBee sur la carte arduino via un Shield XBee. On exécute l'application XCTU, puis on a appuyé sur le bouton "Découvrez modules radio connectés", sélectionnez le port de communication approprié et le configurer (vitesse de transmission=9600 bauds, nombre de bit de données : 08 bit, bit stop : 1 bit,..., etc). Ensuite, dans le mode de travail de configuration on doit configurer les paramètres suivants pour que les deux modules XBee communiquent :

Pour l'émetteur XBee :

- ID PAN (Personal Area Network): qui est le numéro de réseau : **3332**

- SC (Scan Channels) : **C**.
- CE (Coordinateur Enable) : **Router**.
- AP API Enable : **API Enable 2**

Pour récepteur XBee :

- ID PAN (Personal Area Network) : qui est le numéro de réseau :**3332**
- SC (Scan Channels) : **C**.
- CE(Coordinateur Enable): **Coordinator**
- AP API Enable :**API Enable2**

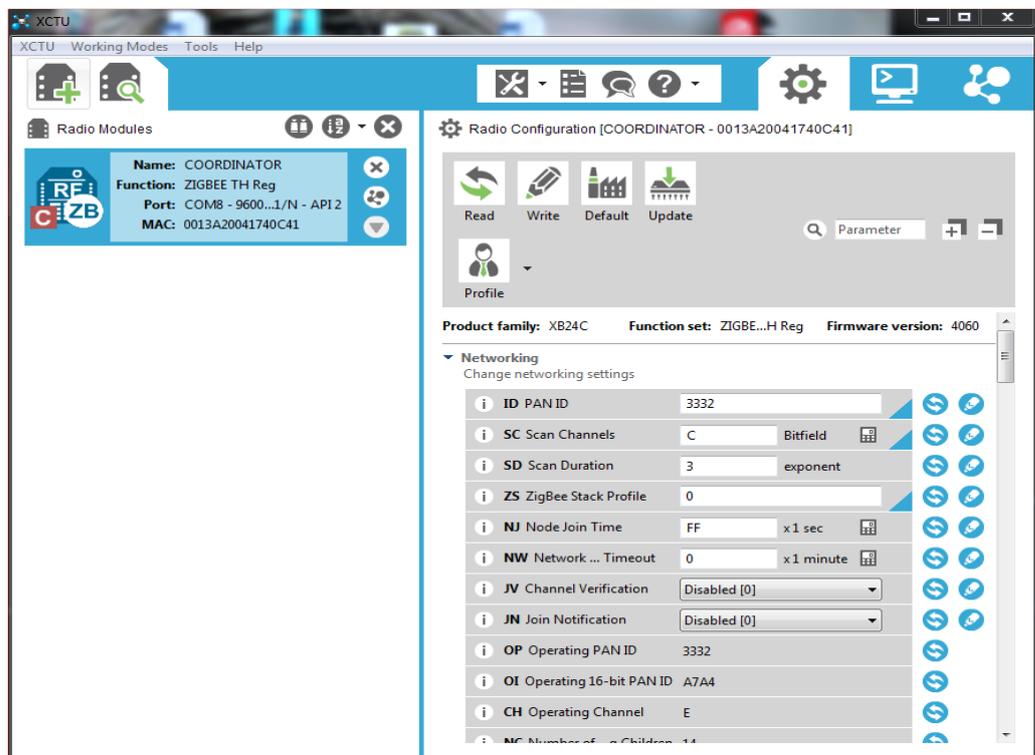


Figure III. 3 : Paramètres du module de réception.

- **Configuration du réseau :**

Le module XBee routeur est configuré pour une émission d'une chaîne de caractères de 0.5s et un délai de 10ms d'intervalle de répétition, On lance le scan réseau sous Xctu du module coordinateur afin d'intégrer le module routeur aux réseaux.

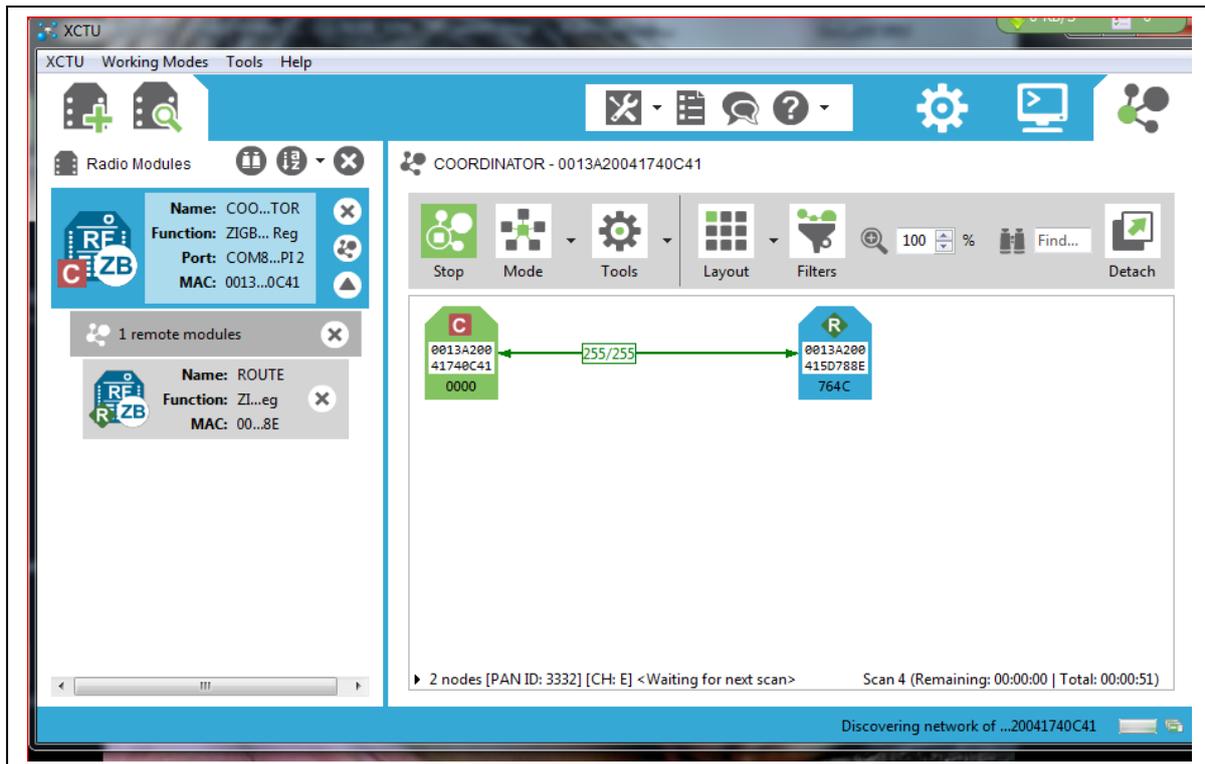


Figure III. 4: Connexion des deux modules XBee.

III.3. Testes pratiques et résultats :

Les tests pratiques sont devisés en trois parties :

- **Extraction de l'exposant n :**
 - Mesure de la puissance de signal par le programme Matlab.
 - Mesure de la puissance du signal par le programme Xctu.
- **Calcul des distances estimées :**
 - Calcule des distances estimées à partir des mesures RSS obtenues via Matlab.
 - Calcule des distances estimées à partir des mesures RSS obtenues via Xctu.
- **Calcul de l'erreur de mesure.**

III.3.1. Mesures pratiques des niveaux de RSS :

Pour la mesure du RSS on doit tout d'abord choisir le model de propagation. Dans notre cas on a utilisé le model espace libre (free space model) décrit dans le chapitre 2 (équation II.1).

Le milieu de propagation est un couloir au rez-de-chaussée, mesure 40 m situé dans un immeuble de notre faculté (couloire des Labos de recherche).



Figure III. 5 : Environnement pratique (couloir au niveau de la faculté).

Dans un premier lieu on a effectué des mesures du RSS à partir des distances connues dans le but est de mesurer la valeur de A et la valeur de n . On a effectué le test pour chaque distance trois fois, les résultats obtenus sont illustré sur le tableau III.2. L'outil software utilisé est un programme sous Matlab.

d(m)	RSSA	RSSB	RSSC	RSS(dB)
1m	-29.14	-26.73	-26.31	-27.40
2m	-34.23	-32.35	-34.04	-33.50
3m	-34.99	-39.66	-34.13	-36.20
4m	-36.50	-39.65	-34.02	-36.70
5m	-39.90	-36.96	-34.68	-36.90
6m	-44.45	-33.85	-42.70	-40.33
7m	-52.32	-39.46	-36.55	-42.78
8m	-49.54	-46.98	-35.11	-43.88
9m	-45.72	-46.00	-39.44	-43.70
10m	-46.06	-49.05	-49.59	-48.23
11m	-40.81	-49.89	-37.36	-42.67
12m	-43.87	-46.83	-40.66	-43.79
13m	-49.71	-40.14	-43.40	-44.41
14m	-40.91	-41.08	-38.89	-40.29
15m	-43.65	-34.16	-38.64	-38.81
16m	-39.75	-36.93	-40.84	-38.87
17m	-53.21	-41.12	-40.78	-45.03
18m	-49.56	-38.68	-37.68	-41.98
19m	-64.12	-38.91	-39.24	-47.42
20m	-43.53	-43.27	-38.96	-41.92
21m	-52.64	-57.69	-42.14	-50.82

d(m)	RSSA	RSSB	RSSC	RSS(dB)
22m	-45.67	-50.54	-42.20	-46.13
23m	-48.86	-45.94	-49.90	-48.23
24m	-45.20	-48.77	-45.73	-46.60
25m	-42.83	-45.6	-43.00	-43.81
26m	-44.23	-43.69	-43.88	-43.93
27m	-43.95	-46.16	-48.00	-46.03
28m	-49.60	-45.09	-53.09	-49.26
29m	-69.42	-46.74	-53.84	-55.67
30m	-64.91	-49.68	-53.14	-55.91
31m	-57.94	-62.17	-50.51	56.87
32m	-49.53	-47.03	-45.27	-47.27
33m	-55.14	-47.44	-42.51	-48.36
34m	-59.02	-47.20	-46.00	-50.74
35m	-58.35	-46.30	-49.05	-51.74
36m	-54.31	-49.84	-52.45	-52.20
37m	-62.23	-53.49	-48.74	-54.82
38m	-57.64	-50.44	-48.24	-52.10
39m	-50.29	-51.78	-49.51	-50.52
40m	-49.27	-52.12	-52.42	-51.27
41m	-51.82	-52.05	-49.32	-51.06

Tableau III. 2 : Mesures RSS obtenue par le programme Matlab.

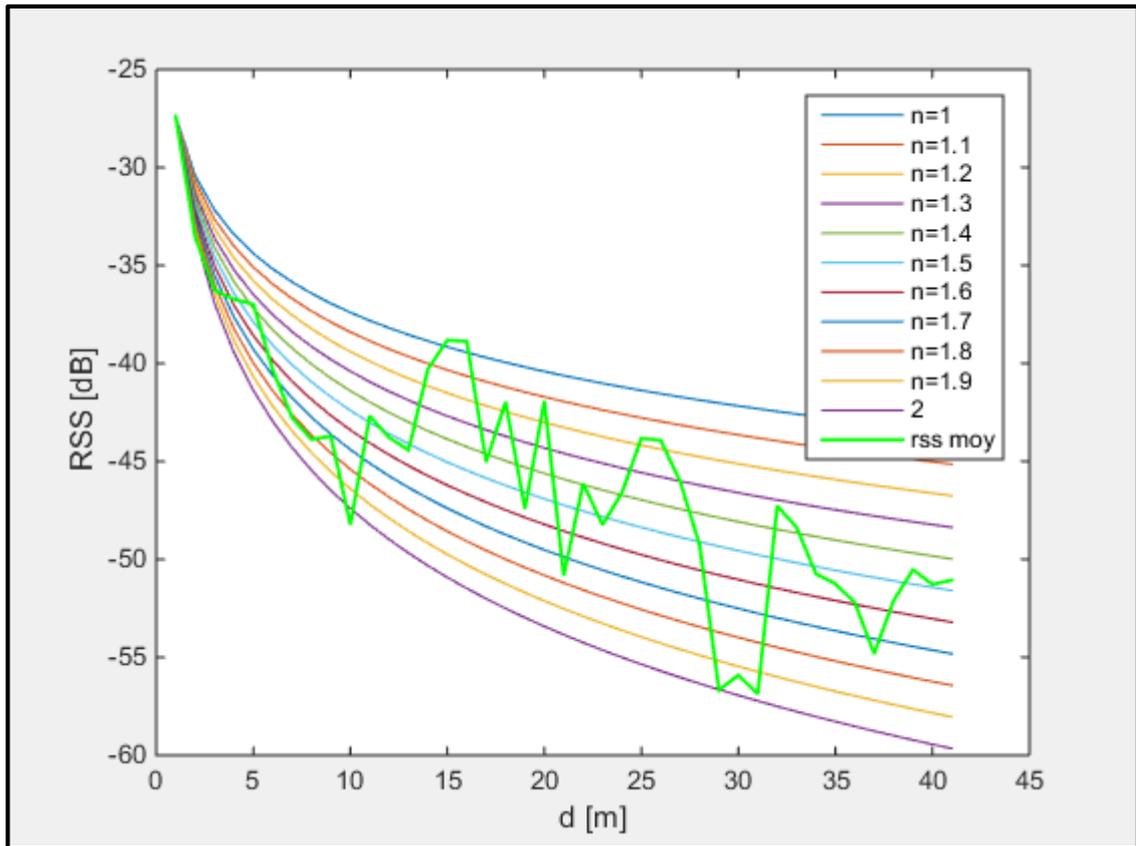


Figure III. 6 : Courbes RSS calculé et la courbe du RSS mesurés en fonction de la distance.

La figure précédente représente les valeurs RSS obtenue par l'équation III.1, avec la variation du l'exposant *n* dans l'intervalle [1 à 2] :

$$RSS= 10n \log (d) + A \quad \dots\dots III.1$$

D'où :

$$A=-27.4 \text{ dB.}$$

Pour déterminer la valeur de l'exposant *n*, il suffit de calculer la racine de l'erreur quadratique moyenne entre la courbe du RSS mesurée et les courbes théoriques. On sélectionnera la valeur de *n* de la courbe théorique qui donne une erreur minimale. La valeur obtenue est *n=1.6*.

III.3.2. Mesures expérimental via le logiciel Xctu :

Dans le scénario suivant on va essayer d'extraire les valeurs RSS directement du logiciel XCTU, en utilisant l'outil radio test range :



Figure III. 7 : Application de mesure RSS sous Xctu (test range).

✓ **Mesure de puissance du signal reçu à partir du XCTU :**

Dans cette partie les valeurs RSS sont extraites directement du logiciel XCTU, pour chaque distance mesuré :

D [m]	RSS [dB]	RSS [A]	RSS [B]	RSS [C]	RSS [D]	RSS [E]	RSS moy
1		-27	-26	-27	-27	-31	-27.6
2		-29	-33	-30	-31	-32	-31
3		-43	-35	-35	-32	-32	-37
4		-37	-31	-38	-47	-22	-37
5		-44	-40	-41	-38	-43	-41.2
6		-42	-37	-33	-37	-38	-39.4
7		-43	-42	-44	-42	-38	-41.8
8		-47	-40	-47	-45	-50	-45.8
9		-53	-51	-47	-47	-49	-49.4
10		-49	-49	-48	-49	-47	-48.4
11		-43	-46	-47	50	-46	-46.4
12		-43	-38	-49	-46	-49	-45
13		-53	-50	-48	-43	-41	-45
14		-47	-43	-50	-43	-44	-45.2
15		-48	-39	-50	-43	-43	-44.6
16		-44	-38	-51	-45	-50	-45.6
17		-49	-43	-53	-44	-40	-45.8
18		-44	-36	-49	-45	-42	-43.2
19		-46	-44	-48	-45	-39	-44.4
20		-41	-60	-48	-44	-38	-46.2
21		-44	-43	-53	-44	-43	-45.4
22		-45	-41	-54	-47	-44	-46.2
23		-47	-43	-54	-42	-46	-46.4
24		-55	-40	-55	-44	-52	-49.2
25		-53	-38	-51	-50	-46	-47.6
26		-51	-39	-51	-44	-45	-46
27		-46	-43	-54	-46	-48	-47.4
28		-55	-44	-56	-48	-51	-50.8
29		-50	-42	-61	-49	-48	-50
30		-53	-41	-58	-56	-41	-49.8
31		-52	-44	-52	-49	-50	-49.4
32		-53	-47	-53	-49	-49	-50.2
33		-50	-45	-57	-46	-48	-49.2
34		-51	-48	-59	-45	-48	-50.2
35		-55	-61	-60	-47	-49	-54.4
36		-53	-53	-60	-49	-50	-53
37		-53	-59	-59	-50	-50	-54.2
38		-56	-55	-60	-58	-49	-54.6
39		-56	-49	-58	-51	-49	-52.6
40		-52	-45	-54	-51	-52	-50.8
41		-47	-44	-56	-48	-54	-49.8

Tableau III. 3 : Mesures RSS obtenue par Xctu.

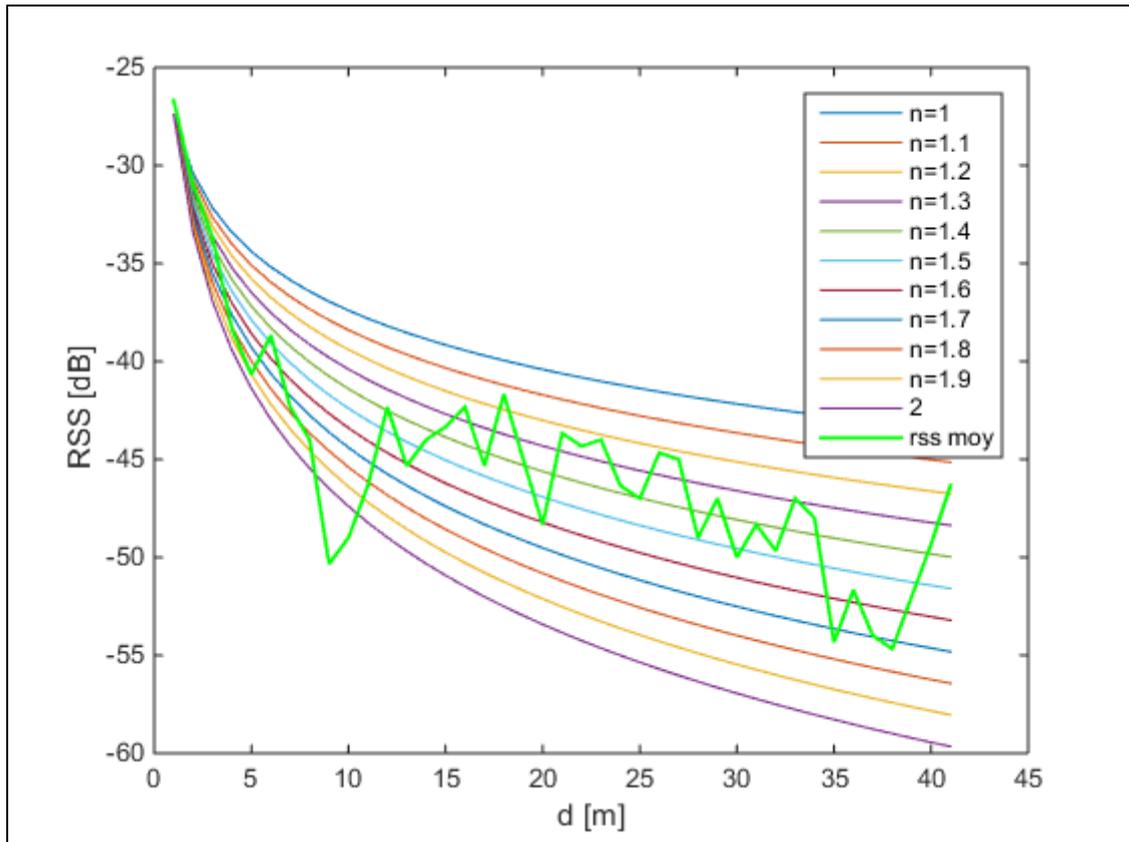


Figure III. 8 : Courbes du RSS (n) calculé et la courbe du RSS moyenne mesurés en fonction de la distance.

La figure (III.8) représente les valeurs RSS obtenue par l'équation III.1, avec la variation du l'exposant *n* dans le même intervalle, et la courbe de la valeur RSS moyenne des mesures expérimental. Dans le cas des mesures extraient depuis XCTU la valeur de l'exposant *n =1.5* et *A= -27.6 dB*. D'où la relation -RSS(d) est donnée par :

$$RSS (d)= [10.(1,5).log (d)]-27,6 \quad \text{..... III.2}$$

Et on a calculé les distances mesurée par l'équation :

$$d = 10^{\frac{RSS(d)+27.6}{10*1,5}} \quad \text{..... III.3}$$

III.4. Calcul des distances :

Afin d'obtenir les meilleures performances de notre système on a calculé la valeur de l'exposant n idéal pour notre environnement de localisation, et on a refait les mesures via le programme Matlab, en suite par le programme Xctu.

III.4.1. Distances mesurées par Matlab :

Distance réel (m)	Distance mesuré (m)	RSS mesuré (dB)
1	1.40	-29.60
2	2.10	-32.22
3	3.33	-35.21
4	5.85	-38.90
5	5.39	-38.39
6	7.02	-40.08
7	6.88	-39.92
8	9.93	-42.31
9	10.47	-42.7
10	11.30	-45.28
11	7.96	-42.44
12	12.60	-46.08
13	13.36	-44.29
14	15.25	-45.11
15	14.36	-46.82
16	15.52	-47.61
17	14.42	-47.03
18	19.95	-46.9
19	14.26	-47
20	17.38	-48.45
21	23.69	-48.02
22	22.42	-47.66
23	22.98	-50.49
24	26.42	-48.73
25	24.43	-48.22
26	29.60	-49.47
27	23.19	-49.86
28	17.04	-45.50
29	26.99	-48.82
30	34.41	-50.41
31	26.44	-48.72
32	29.99	-48.59
33	32.40	-50.06
34	35.75	-50.70
35	33.47	-50.27
36	36.86	-50.9
37	37.43	-51
38	38.07	-51.11
39	40.30	-51.48
40	42.85	-51.88
41	43.78	-52.02

Tableau III. 4 : Distances calculés à partir des mesures rss.

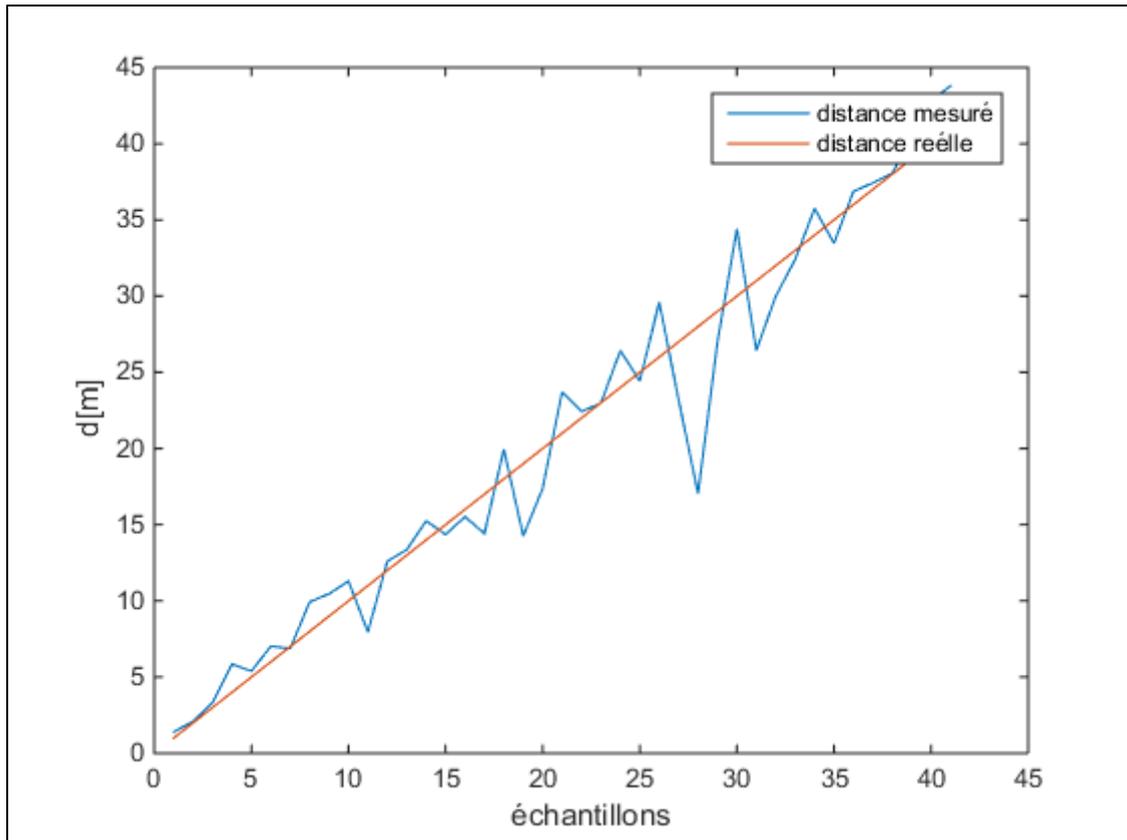


Figure III. 9 : Distances calculées en fonction de la distance réelle.

La figure III.9 traduit les valeurs des distances calculées par rapport aux distances réelles, comme c'est illustré les valeurs calculées sont approximatives proches des valeurs réelles, et tant que la cible s'éloigne du récepteur on remarque l'augmentation de l'erreur de l'estimation de la distance.

Par la suite on va utiliser l'outil test range du programme Xctu, afin de déterminer les valeurs de la puissance du signal sur le même parcours précédant.

III.4.2. Distances calculés par mesures RSS via Xctu :

d (réel) [m]	d (mesuré) [m]	d (réel) [m]	d (mesuré) [m]
1m	1.16	22m	21.54
2m	1.35	23m	22.90
3m	3.41	24m	32.11
4m	3.41	25m	25.11
5m	5.40	26m	25.90
6m	6.30	27m	26.70
7m	7.35	28m	27.54
8m	10	29m	28.84
9m	8.57	30m	29.73
10m	10	31m	30.66
11m	11.65	32m	32.11
12m	11.65	33m	33.11
13m	11.65	34m	34.67
14m	15.84	35m	35.21
15m	15.84	36m	36.30
16m	18.47	37m	37.43
17m	18.47	38m	38.60
18m	23.26	39m	39.81
19m	19.95	40m	40.42
20m	20.26	41m	41.05
21m	21.54		

Tableau III. 5 : Distance calculé à partir des mesures RSS.

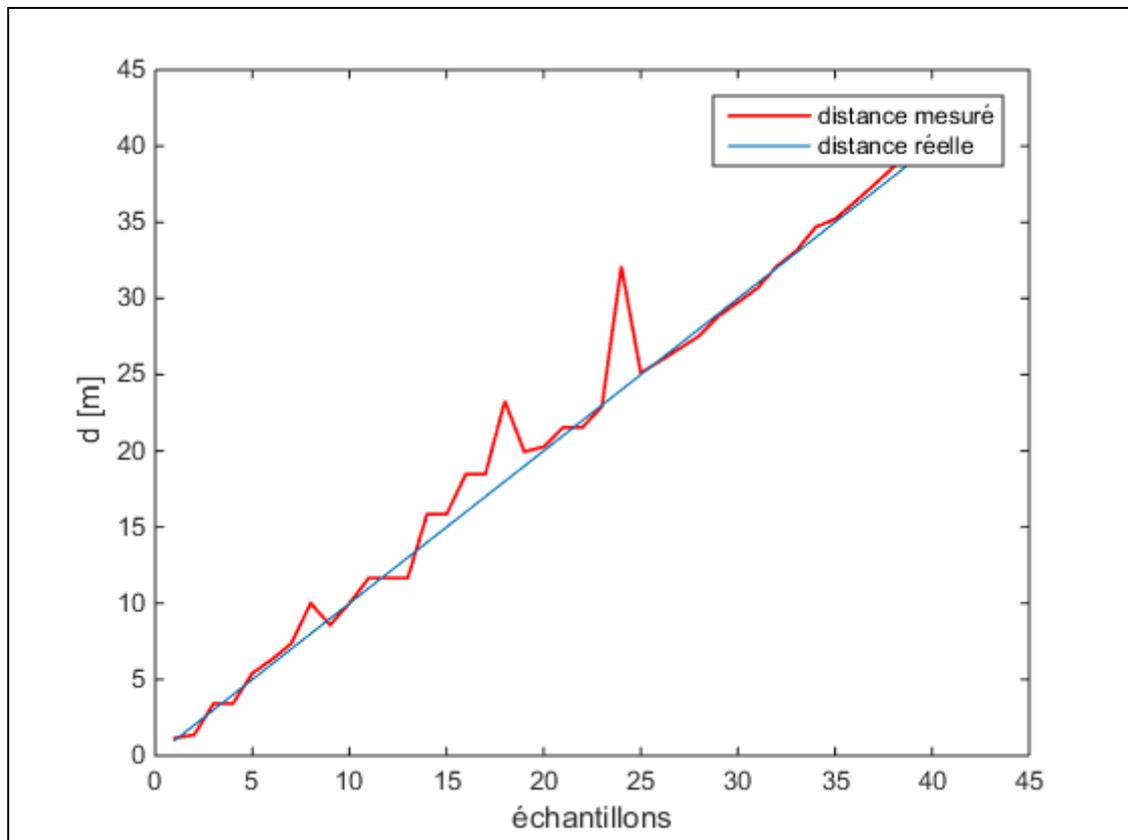


Figure III. 10 : Courbe des distances mesurées et courbe des distances réelles.

Les courbes présentées dans la figure (III.10) correspondent aux distances calculées à partir des mesures de la puissance reçus par notre système de mesure (présenté sous le tableau III.5), par rapport à la distance réelle, les résultats comme motionné précédemment sont plus précis dans un délai de 1s et 200 ms de réception.

III.5. L'erreur de mesures des distances :

L'environnement du déroulement des tests pratiques, présente nombreuses sources de perturbations, tel que les murs, objets métalliques, plafond, et des perturbations humaines (passagers), par conséquent les résultats de mesures présentent une certaine marge d'erreur, qui dépend de ces diverses perturbations, la figure suivante correspond à l'erreur de mesures des distances via le programme Matlab et le programme test range du logiciel Xctu :

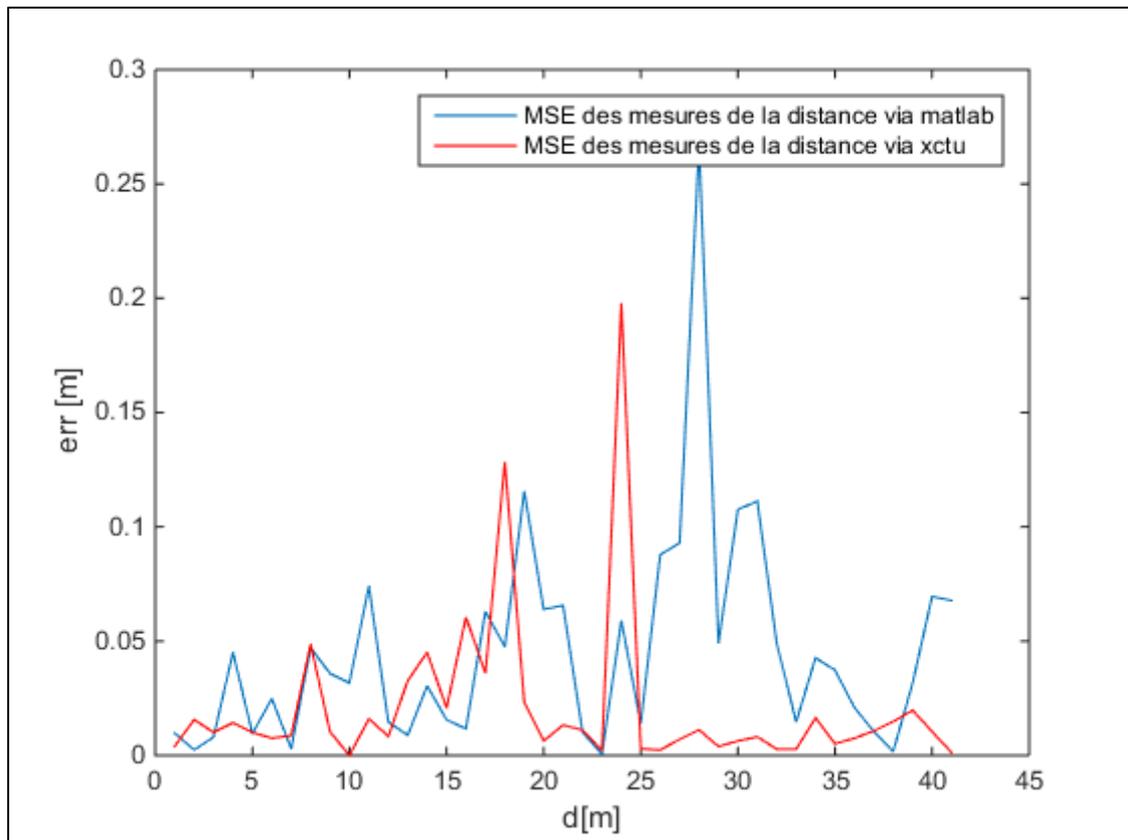


Figure III. 11 : MSE des mesures RSS.

D'après la figure (III.11), on distingue que les mesures prises via Matlab présentent plus d'erreurs que celle de logiciel Xctu, parce que cette dernière est prise en tant que la valeur moyenne du RSS dans un intervalle de temps de 100 ms de réception, bien que l'autre est prise par Matlab au moment du lancement du programme.

III.6. Conclusion :

Ce chapitre, a permis une étude expérimentale de la mesure d'une distance entre deux modules XBee, Les tests effectués consistent à la détermination de la distance séparant deux systèmes de communication ZigBee en utilisant la puissance du signal reçu.

Les résultats qui ont été présentés confirment l'aptitude du système à être utilisé dans des applications de localisation. Bien que les tests ont présenté certains taux d'erreurs dus à la qualité des matériels utilisés, et à l'environnement de communication.

Conclusion Générale

De nos jours, la localisation est une nécessité absolue, d'où plusieurs systèmes viennent d'apparaître, soit des systèmes de positionnement indoor ou Outdoor, ainsi que plusieurs techniques et méthodes, qui visent divers secteurs et domaines.

L'objectif de ce travail est l'implémentation d'un système de communication basé sur le protocole ZigBee, afin de mesurer la distance entre les entités de la chaîne de communication, dans des fins de localisation.

Nous avons présenté dans un premier lieu l'état de l'art de la localisation à savoir les systèmes de localisation les plus fiables et les plus utilisés, chaque système fonctionne sous un environnement de localisation précis. Ainsi que les techniques dédiées à des applications de localisation (AOA, TOA, TDOA, et RSS), et les méthodes de positionnement, et les facteurs d'erreurs qui agissent sur la précision des résultats de localisation.

Par la suite, on a abordé la technique de localisation par la mesure de la puissance du signal reçu et les différents moyens logiciels et matériels qui seront utilisés dans la mesure de distance entre un émetteur et un récepteur.

Finalement, on a donné une description détaillée du montage électronique (chaîne de transmission) utilisé pour mesurer une distance en se basant sur les modules XBee. On a décrit aussi les différentes étapes de mesure par les deux outils Matlab et XCTU. Le calcul de l'erreur de mesure, nous élucide les effets de l'environnement de communication sur les puissances du signal reçu, ainsi que sur les mesures de la distance.

Notre travail sur les modules XBee pour la mesure de distance peut être exploité, dans des travaux futurs avec l'implémentation du même système de communication avec plusieurs modules XBee pour que les mesures RSS soient utilisées dans un algorithme de localisation.

Références bibliographiques

- [1] Jonathan Bosse, « Géolocalisation de sources radio-électriques : stratégies, algorithmes et performances », thèse de doctorat, électronique, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2012.
- [2] A. Roxin, J. Gaber, M. Wack and A. Nait-Sidi-Moh - “Survey of Wireless Geolocation Techniques”, IEEE Globecom Workshops, 2007.
- [3] Donnay Fleury Nahimana, « Impact des multi trajets sur les performances des systèmes de navigation par satellite : contribution à l’amélioration de la précision de localisation par modélisation bayésienne », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2009.
- [4] I. Ahriz Roula, « Application des techniques d’apprentissage à la géolocalisation par radio fingerprint », thèse doctorat électronique, l’université pierre et marie curie, paris ,2010.
- [5] k. Ignace Kossonou, « Étude d’un système de localisation 3-D haute précision basé sur les techniques de transmission Ultra Large Bande à basse consommation d’énergie pour les objets mobiles communicants »,thèse doctorat Electronique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, Côte d’Ivoire, 2014.
- [6] H. Zoulgami, « Conception et développement d’une application paramétrable et configurable pour la collecte des données géolocalisées », mémoire Ingénieur d’Etat, systèmes électroniques et télécommunications, université sidi ben Abdellah, 2011.
- [7] Ch. Bisseriex et all, «la RFID », Champs électromagnétiques, ed 4217, institut National de recherche et de sécurité, Lyon, 2010.
- [8] F. Bouziane, « Une approche pour l’hybridation des techniques de localisation », mémoire magister, systèmes informatiques intelligents et communiquant, université El-Hadj Lakhedar, Batna, 2014.
- [9] S. Paul, «application des algorithmes de haute résolution à la localisation de mobiles en milieu confiné », rapport de thèse doctorat, micro et nano technologies, acoustiques et télécommunication, université des sciences et technologies de Lille, 2010.

- [10] D. Réjane, « Méthodes de localisation par le signal de communication dans les réseaux de Capteurs sans fil en intérieur », thèse doctorat, systèmes Informatique et Systèmes Embarqués, université de Toulouse, 2013.
- [11] Evanaska Maria Barbosa Nogueira, « conception d'un système d'antennes de localisation en temps réel avec réseau de capteurs sans fil », thèse doctorat, optique et radiofréquences, université de Grenoble, Français, 2013.
- [12] K.Haji Mahmoud, « data collection and processing from distributed system of wireless sensors », thèse doctorat, informatique, université masarykiana, Brno, 2013.
- [13] ZigBee Specification, ZigBee Document 053474r05, Version 1.0. Sponsored by: ZigBee Alliance. June 20, 2005. En ligne « <http://www.zigbee.org/en/> », consulté le 17 aout 2019.
- [14] B. COTTENCEAU « Carte ARDUINO UNO Microcontrôleur ATmega328 » cours, école d'ingénieur de l'université d'Angers.
- [15] Digi Corporation, Solutions Product, en ligne « https://www.digi.com/products/embedded-systems/rfmodules?fbclid=IwAR2mDDDKopNCbiG7L_vcvBT3WRMheB93ShIUffeYCP4gR4ma1khlG3nSbI », consulté le 28 juillet 2019.
- [16] Digi Corporation, XBee ZigBee product manual, en ligne http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_P.pdf, consulté le 24 aout 2019.
- [17] R. Faludi. "Building Wireless Sensors Networks". ISBN 978-0-596-80773-3. USA, 2011.
- [18] <https://skyduino.wordpress.com/2012/04/03/comparatif-des-differentes-cartes-arduino-et-des-cartes-compatible-arduino/:solutions> Product, en ligne « <https://www.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee-tools/xctu?fbclid=IwAR0MdrJmhtfO2mplDOkR6jQ8-R-SY3dmAt6PZZWEicTVlwldmtqQiT582D8> », consulté le 28 juillet 2019.
- [19] J. Noël Montagné, « Atelier Arduino, Initiation à la mise en œuvre matérielle et logicielle de l'Arduino », Centre de Ressources Art Sensitif, novembre 2006.

[20] C. FREOU et A. Grimault « Découverte des cartes Arduino » en ligne : <http://www.techmania.fr/>, Consulté le 29 juillet 2019.

[21] « Cours Arduino », en ligne «<http://www.didel.com/diduino/Cours01.pdf> », consulté le 2 aout 2019.