الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de Fin d'Etude Pour l'Obtention du Diplôme

De Master en Systèmes de Télécommunications

THEME :

LA LOCALISATION DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

Préparé et présenté par:

Mr.SALEM Billel

Mr.DEFILIA El-Mahdi

Proposé et dirigé par:

Mr.GUEDMANI Mohamed

Année Universitaire 2013-2014

Année Universitaire 2013-2014



Remerciements

Au terme de ce projet, de fin d'étude et en préambule au mémoire rédigé nous tenons à adresser nos remerciements à tous professeurs qui nous ont enseigné au cours des cinq années du cursus universitaire pour l'obtention du diplôme Master en télécommunication.

Nous remercions particulièrement avec gratitude tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de prendre notre modeste travail en considération et en suite de le juger.

Nous exprimons notre reconnaissance et nos plus vifs remerciements à notre encadreur ***Mr. Mohamed Gudemani****, pour ses conseils, son aide, pour son soutien moral et scientifique efficace et constant durant toute cette année.*

Nous exprimons ensuite notre plus profonde gratitude à ***Mr. Thomas Watteyne****, pour son aide, ses conseils.*

Nous remercions la direction de laboratoire de l'université Docteur « ***YAHIA FARES*** *», nous tenons à remercier vivement tous les travailleurs du stade de football «* ***IMAME LYES*** *» de la commune de Médéa où nous réalisons notre projet de fin d'étude ainsi que toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.*



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail particulièrement :

A ma ***maman****, A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, Qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrême amour et la bonté, Qu'elle m'a offert pour me voir réussir ;*

A mon ***papa****, A l'homme que je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect ; Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi.*

A mon ***frère Brahim****, A mes* ***chères sœurs****, A mes* ***beaux-frères****, A toute ma* ***famille****, A tous mes* ***amis*** *sans exception.*

A tous ceux qui m'aiment ; et tous ceux que j'aime.

SALEM BILLEL

2014

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail particulièrement :

A ma ***maman****, A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, Qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrême amour et la bonté, Qu'elle m'a offert pour me voir réussir ;*

A mon ***papa****, A l'homme que je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect ; Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi.*

A mon ***frère Fathi,*** *A mes* ***chères sœurs****,*

A toute ma ***famille****, A tous mes* ***amis*** *sans exception.*

A tous ceux qui m'aiment ; et tous ceux que j'aime.

DEFILIA EL-MAHDI

2014

الملخص :

يعتبر موضوع الشبكات المستشعرة من أهم الميادين التكنولوجية التي تم طرحها في القرن الواحد والعشرين، حيث نهدف من خلال هذا العمل الى دراسة تأثير عدة عوامل على دقة التموقع وذلك في الاماكن المفتوحة، منها استطاعة الاشارة وترددها المتبادلة بين المستشعرات وذلك اعتمادا على قياس استطاعة الاشارة المستقبلة (مؤشر استطاعة الاشارة المستقبلة). وذلك من اجل الحصول على أحسن تردد واستطاعة اللذان يعطيان أقل خطأ في مايخص دقة التموقع .

كلمات مفتاحية : التموقع، الشبكات المستشعرة اللاسلكية، تقدير المسافة، مؤشر استطاعة الاشارة المستقبلة.

Résumé :

Le sujet des réseaux des capteurs est parmi les domaines les plus importants de la technologie qui ont été emis dans le XXIe siècle, dans ce travail nous avons étudié l'impact de plusieurs facteurs sur la précision de localisation , y entre la puissance et la fréquence échangée entre les capteurs basant sur le calcul de l'indicateur de la puissance du signal reçue (RSSI) afin d'obtenir les meilleurs fréquence et puissance d'émission qui correspondent à une faible erreur d'estimation de distance.

Mots clés : Localisation, Réseaux de capteurs sans fil, Estimation de distance ,L'indicateur de la puissance du signal reçue.

Abstract :

The subject of the networks of the sensors among the most important fields of technology which were put in 21 century, in this work we studied the impact of several factors on the precision of localization, including between the power and the frequency exchanged between the sensors basing on the calculation of the Received Signal Strength Indicator (RSSI) in order to obtain best the frequency and power of emission which to correspond to a weak error in estimation of distance.

Keywords: Localization, Wireless Sensor Network, Estimate of distance, Received Signal Strength Indicator.

Table des Matières

TABLE DES MATIERES V

LISTE DES FIGURES VIII

LISTE DES TABLEAUX X

LISTE DES ANNEXES X

LISTE DES ABREVIATIONS XI

Introduction Générale 1

CHAPITRE 1 : GENRALITE SUR LES RESEAUX DE CAPTEUR SANS FIL 3

1. Introduction 4

2. Architecture de communication dans les réseaux de capteurs 4

3. Anatomie d'un capteur sans fil 5

3.1. Architecture interne d'un capteur sans fil 6

4. Les typologies des réseaux de capteurs sans fil 7

5. Technologies utilisés 8

5.1. Bluetooth 9
5.2. ZigBee 9
3.3. DASH7 10
3.4. Comparaison entre les différents standard 10

6. Les protocoles MAC dans WSN 10

6.1. La méthode d'accès CSMA/CA 11
6.2. La couche physique IEEE 802.15.4 11
6.3. La couche MAC dans IEEE 802.15.4 12

7. Les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil 12

7.1. Application militaire 12
7.2. Application médicale 13
7.3. Surveillance infantile 13
7.4. Divertissement 13
7.5. Applications agricoles 13
7.6. Application de surveillance de l'environnement 13
7.7. Application dans l'espace intelligent 13
7.8. Application de traçabilité et de localisation 13

8. Défis de recherche pour les réseaux de capteurs sans fil 15

8.1. Contrainte de temps réel 15

8.2. Gestion de l'alimentation 16
8.3. Sécurité et confidentialité 16
8.4. Technique d'analyse 16

9. Conclusion 16

CHAPITRE 2 : PRINCIPE D'ESTIMATION DES DISTANCES DANS LES RCSF 17

1. Introduction 18

2. Objectif de localisation 18

3. Définition 19

4. Propriétés d'un système de localisation 19

5. Estimation de distance / angle 20

5.1. Mesure du temps d'arrivée (ToA) 20
5.2. Mesure de la différence des temps d'arrivée (TDoA) 22
5.3. Mesure de l'angle d'arrivée (AoA) 23
5.4. Mesure de RSSI (Indicateur de puissance du signal reçu) 24

6. Méthodes de localisation 26

6.1. Trilatération 26
6.2. Triangulation 27

7. Algorithme de localisation 28

8. Etat de l'art 28

9. Conclusion 29

CHAPITRE 3 : LA PERFORMANCE D'ESTIMATION DES DISTANCES DANS RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL 30

1. Introduction 31

2. Plan de l'experience 31

2.1. Définitions et concepts 32
2.2. Buts et hypothèses 32

3. Expérimentation 33

3.1. Présentation du matériel 33
3.2. Plate-forme logiciel 35
3.3. Programmation des capteurs 36
3.4. Choix du canal de transmission 37
3.5. Choix de la puissance d'émission 40
3.6. Environnement et scénarios des expériences 41
3.7. Technique de récupération de RSSI 42
3.8. Scénarios des expériences 44

4. Résultats et analyses 44

4.1. Prémière expérience 45
4.2. Deuxième expérience 49
4.3. Troisième expérience 53

4.4. Quatrième expérience 57
4.5. Choix de meilleure puissance d'émission 61
5. Validation des résultats trouvés 62
6. Conclusion 63
Conclusion Générale et perspectives 65
Annexe 67
Bibliographie 79
Webographie 82

Liste des Figures

Figure 1.1. *Architecture de communication dans les réseaux de capteur sans fil*…… 4
Figure 1.2. *Modèle en couche du RCSF*…… 5
Figure 1.3. *Architecture interne d'un capteur sans fil*……6
Figure 1.4. *Les différentes topologies de réseau de base*…….. 7
Figure 1.5. *Classement des standards de communication*……..8
Figure 1.6. *Les couches du standard ZigBee*……..9
Figure 1.7. *Les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil*……..15
Figure 2.1. *Composition d'un système de localisation*……...20
Figure 2.2. *a : ToA aller, b : ToA aller-retour, c : TDoA*……...21
Figure 2.3. *Mesure de l'AOA par un réseau de capteurs*……... 23
Figure 2.4. *Trilatération*…… 27
Figure 2.5. *Triangulation*……....27
Figure 3.1. *Plan de l'expérience*……32
Figure 3.2. *Le capteur MSP 430-RF2500 et son support batterie*…… 33
Figure 3.3. *Le kit de développement eZ430-RF2500*……..34
Figure 3.4. *Photo support de capteur*……34
Figure 3.5. *Organigramme général d'émission et de réception des paquets de donnée par un capteur*…...36
Figure 3.6. *Décomposition du canal ISM*……... 37
Figure 3.7. *Analyseur de spectre virtuel*……39
Figure 3.8. *Capture d'écran de l'environnement Cygwin*…….. 39
Figure 3.9. *Photo de l'Environnement des expériences*……..41
Figure 3.10. *Trame de paquet échangé pour le CC 2500*……42
Figure 3.11. *Capture d'écran de la carte virtuelle relative au réseau WSN*…… 43
Figure 3.12. *Capture d'écran de l'environnement Cygwin*…….. 43
Figure 3.13. *RSSI en fonction de la distance réelle pour les cinq canaux à 1dBm*……..45
Figure 3.14. *Distances réelles et estimées pour les cinq canaux à 1dBm*…… 46
Figure 3.15. *L'écart entre les distances réelles et estimées pour les cinq canaux a 1dBm*…… 47
Figure 3.16. *L'évolution de l'erreur RMSE en fonction canal de transmission à 1dBm*…… 48
Figure 3.17. *RSSI en fonction de la distance réelle pour les cinq canaux à -10dBm*……...49
Figure 3.18. *Distances réelles et estimées pour les cinq canaux à -10dBm*……50
Figure 3.19. *L'écart entre les distances réelles et estimées pour les cinq canaux a -10dBm*…….. 51
Figure 3.20. *L'évolution de l'erreur RMSE en fonction canal de transmission à -10dBm*……..52
Figure 3.21. *RSSI en fonction de la distance réelle pour les cinq canaux à -20dBm*……...53
Figure 3.22. *Distances réelles et estimées pour les cinq canaux à -20dBm*……54
Figure 3.23. *L'écart entre les distances réelles et estimées pour les cinq canaux a -20dBm*…….. 55
Figure 3.24. *L'évolution de l'erreur RMSE en fonction canal de transmission à -20dBm*……..56
Figure 3.25. *RSSI en fonction de la distance réelle pour les cinq canaux à -30dBm*……...57

Figure 3.26. *Distances réelles et estimées pour les cinq canaux à -30dBm*……58
Figure 3.27. *L'écart entre les distances réelles et estimées pour les cinq canaux a -30dBm*…….. 59
Figure 3.28. *L'évolution de l'erreur RMSE en fonction canal de transmission à -30dBm*…….. 60
Figure 3.29. *L'évolution de RMSE en fonction de la puissance de transmission au canal 4*……...61
Figure 3.30. *L'évolution de toutes les puissances en fonction des canaux de transmission*……..... 62
Figure 3.31. *L'encombrement spectral de la bande ISM*……..63

Liste des Tableaux

Tableau. 1.1. *Comparaison entre les différents standards*…… 10
Tableau. 2.1. *Comparaison entre les méthodes d'estimation de distance*…… 25
Tableau. 3.1. *Le codage typique de la bande ISM*…… 40
Tableau. 3.2. *Variation typique de la puissance d'émission*…….. 41
Tableau. 3.3. *les valeurs d'erreurs RMSE pour les canaux utilisés à 1dBm*…… 48
Tableau. 3.4. *Les valeurs d'erreurs RMSE pour les canaux utilisés à -10dBm*…… 52
Tableau. 3.5. *Les valeurs d'erreurs RMSE pour les canaux utilisé à -20dBm*…….. 56
Tableau. 3.6. *Les valeurs d'erreurs RMSE pour les canaux utilisé à -30dBm*……... 60

Liste des Annexes

Annexe A: les packages Cygwin à installer…….. 68
Annexe B: Programme **txrx_wsn.c**……...69
Annexe C: Programme **txrx_noise.c**……76
Annexe D: Programme **txrx_simple.c**…….. 78

Liste des Abréviations

AoA : Angle of Arrival
BSP : Board Support Package
CAN : Convertisseur Analogique Numérique
CCA : Clear Channel Assessment
CCS : Code Composer Studio
CPU : Central Processing Unit
CSMA/CA : Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance
E : Emetteur
ED : Energie Détection
FSK : Frequency Shift Keying
GFSK : Gaussian Frequency Shift Keying
GPS : Global Positionning System
GSM : Global System for Mobile
IDE : Integrated Development Environment
IEEE : Institue Of Electrical and Electronic Engineers
ISM : Industrial Scientific and Medical
LQI : Link Quality Indicator
MAC : Medium Access Control
MIPS : Million Instruction Par Second
MRFI : Minimal Radio Frequency Interface
OSI : Open System Interconnection
PC : Personal Computer
QoS : Quality of Service
QPSK : Quadrature Frequency Shift Keying
R : Récepteur
RADAR : Radio Detection And Ranging
RCSF : Réseau de Capteur Sans Fil
RF : Radio Frequency
RFID : Radio Frequency Identification
RMSE : Root Mean Square Error
RSS : Received Signal Strength
RSSI : Received Signal Strength Indicator
TDoA : Time Difference of Arrival
TI : TEXAS INSTRUMENTS
ToA : Time Difference of Arrival
USB : Universal Serial Bus
WSN : Wireless Sensor Network

Introduction Générale

Les réseaux de capteurs sans fil, peuvent se révéler très utiles dans de nombreuses applications lorsqu'il s'agit de collecter et de traiter des informations telles que : la surveillance de l'environnement, l'agriculture de précision, les applications médicales, les bâtiments et structures intelligentes, la détection de panne, et le suivi de cibles. Ces réseaux de capteurs sans fil ont été considérer comme étant parmi les technologies les plus importantes du 21ème siècle.

Dans bon nombre d'applications, un événement détecté par un capteur n'est utile que si une information relative à sa localisation géographique est fournie. C'est le cas de la surveillance des feux de forêt ou de troupes ennemies dans un contexte militaire. Sans cette information, ces applications n'auraient aucun sens. Il s'agit donc de déterminer pour chacun des capteurs sa position.

La localisation est devenue une information à grande valeur ajoutée, que cela soit d'un point de vue de la sécurité ou de la logistique , en plus, la connaissance des positions des capteurs dans l'environnement est souvent souhaitable, afin de pouvoir déterminer l'origine des flux de mesures collectées.

La localisation des capteurs est un des principaux problèmes dans ce type de réseaux et nombreuses sont les solutions qui ont été proposées pour le résoudre, chacune faisant des hypothèses diverses sur les capacités des capteurs. En plus, il est un parmis des travaux antérieurs dans le domaine des réseaux de capteurs puisque les capteurs peuvent être déployer arbitrairement, leur emplacement doit être connu afin de fournir des données significatives à l'utilisateur. De plus, des informations sur les positions des capteurs peuvent être nécessaires pour les protocoles utilisés dans les couches réseau et liaison.

Pour ces multiples raisons, il nous a semblé intéressant d'étudier le problème permettant aux nœuds simples d'estimer leur position en fonction de leur environnement radio. Ce mémoire se focalise sur le problème de la localisation dans les réseaux de capteurs, par le biais de la communication radio.

La localisation dans les réseaux de capteurs se fait en deux étapes :

L'estimation des distances et la dérivation des positions. **[38]**

Le majore problème rencontré dans le domaine de localisation est l'estimation des distances inter capteurs, plusieurs solutions ont été proposées pour le résoudre en fonction des capacités des capteurs utilisés.

Notre travail revient a cherché une solution au problème d'estimation des distances en se basant sur la puissance du signal reçu (**RSS**) par un capteur récepteur. De nombreuses études qui considèrent la puissance du signal reçu comme métrique pour estimer la distance entre deux capteurs montrent que le **RSSI** peut être influencé par plusieurs paramètres de l'environnement de déploiement des capteurs, alors, qu'il faut prendre en compte l'influence de ces paramètres dans le choix de la méthode et de la technique de mesure des distances.

Notre contribution dans le domaine de localisation dans les RCSFs est de trouver le bon canal de transmission parmi les seize canaux utilisés par la bande ISM, ainsi que la puissance optimal d'émission qui nous permet d'estimer les distances avec une faible erreur pour le cas des capteurs MSP 430-RF2500.

Ce manuscrit est composé de trois chapitres :

Chapitre 1 : Est consacré aux généralités sur les réseaux de capteurs sans fil et leurs domaines d'applications.

Chapitre 2 : Sera consacré aux principes techniques et méthodes de localisation et l'estimation des distances dans les réseaux de capteurs sans fil.

Chapitre 3 : Dans ce chapitre, on réalise les expériences qui nous montrent l'influence des deux paramètres : canal de transmission et puissance d'émission sur la mesure des RSSIs afin d'estimer les distances avec une faible erreur.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉ SUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

1. Introduction

Les avancées technologiques récentes confortent la présence de l'informatique et de l'électronique au cœur du monde réel. De plus en plus d'objets se voient équipés de processeurs et de moyens de communications mobiles, leur permettont de traiter des informations, mais également de les transmettre.

Les réseaux de capteurs sans fil entrent dans ce cadre. En effet, ceux-ci sont constitués d'un ensemble de petits appareils, ou capteurs, possédant des ressources particulièrement limitées, mais qui leur permettent néanmoins d'acquérir des données sur leur environnement immédiat, de les traiter et de les communiquer. **[1]**

2. Architecture de communication dans les réseaux de capteurs

Les nœuds de capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de capture. Chacun de ces nœuds a la possibilité de collecter les données et de les router vers une ou plusieurs station de base (*Sink Nodes*). Ces derniers sont des points de collecte de données capturées. La station de base peut communiquer les données collectées à l'utilisateur final à travers un réseau de communication, éventuellement l'internet. L'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes au réseau. Cette architecture est illustrée dans la figure 1.1. **[2]**

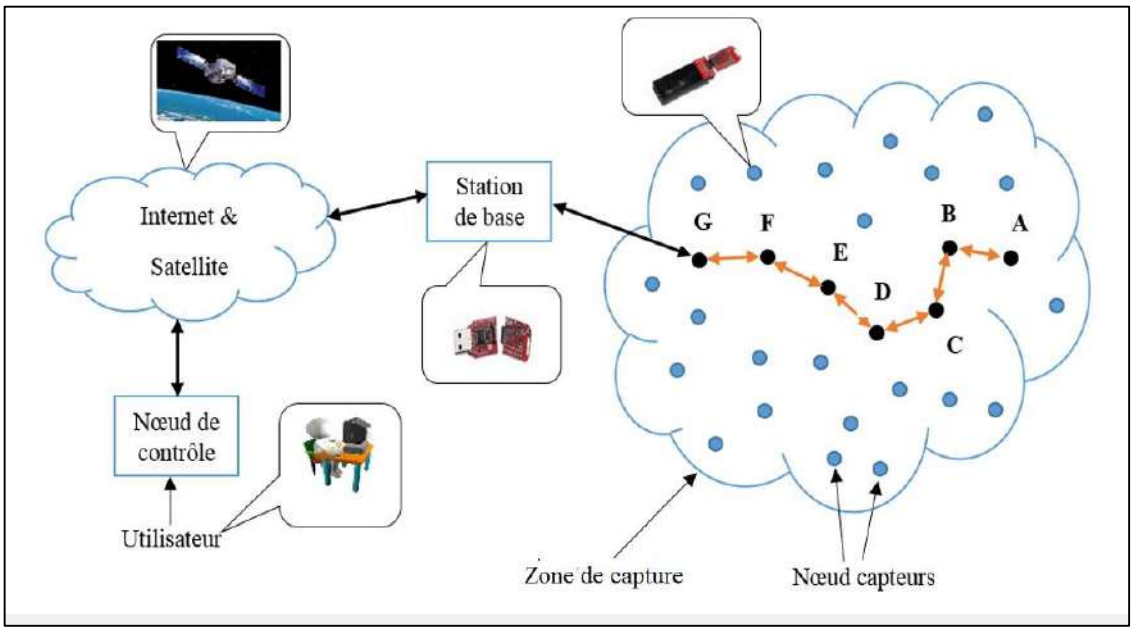


Figure1.1. *Architecture de communication dans les réseaux de capteurs sans fil.*

Dans les réseaux de capteurs sans fil le modèle de communication comprend cinq couches ont les mêmes fonctions que celles de modèles OSI ainsi que trois couches pour la gestion d'énergie, la gestion de la mobilité et la gestion des taches. Ces couches sont illustrées dans la figure 1.2.

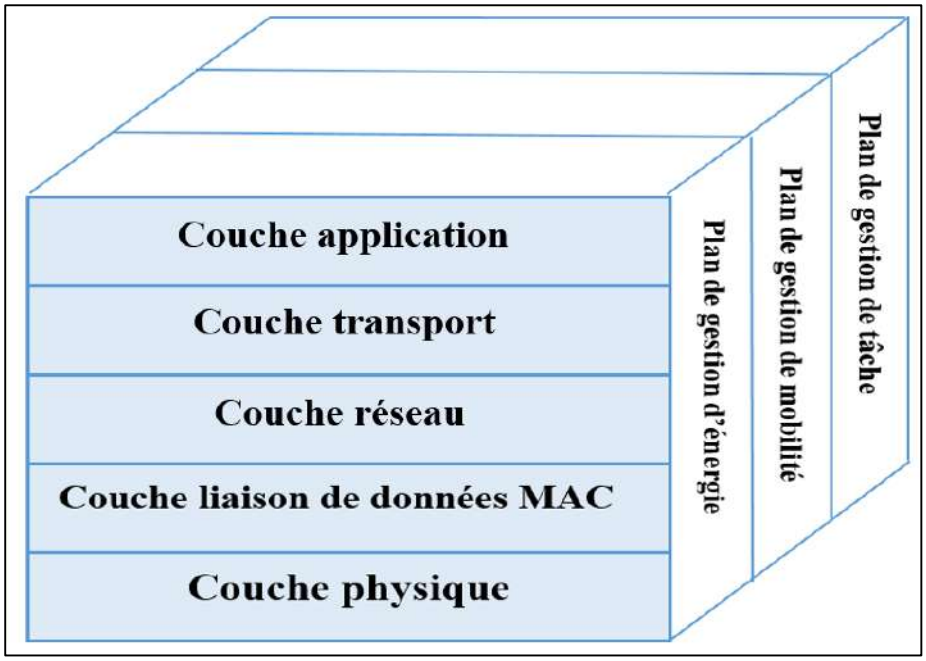


Figure1.2. *Modèle en couche du RCSF.*

Rôles de chaque couche :

- ✓ **Couche physique :** Matériels pour envoyer et recevoir les données.
- ✓ **Couche liaison de données MAC :** gestion des liaisons entre les nœuds et les stations de base, contrôle d'erreurs.
- ✓ **Couche réseau :** routage et transmission des données.
- ✓ **Couche transport :** transport des données, contrôle de flux.
- ✓ **Couche d'application :** interface pour les applications au haut niveau.
- ✓ **Plan de gestion d'énergie :** contrôle de l'utilisation d'énergie.
- ✓ **Plan de gestion de mobilité :** gestion des mouvements des nœuds.
- ✓ **Plan de gestion des taches :** balance les taches entre les nœuds afin d'économiser l'énergie. **[3][4]**

3. Anatomie d'un capteur sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont composés de dispositifs électroniques de petite taille et de faible coût, intégrant un ensemble de fonctionnalité telles que : une unité de calcul,

une mémoire, des sondes et une interface sans fil. Cet ensemble appelé un capteur sans fil, de concert avec ses pairs pour détecter et de contrôler les phénomènes physiques tels que : la température, la pression, le bruit, l'humidité, le champ magnétique. Un capteur est un système embarqué. [6]

3.1. *Architecture interne d'un capteur sans fil*

Un capteur sans fil est composé essentiellement de quatre blocs fonctionnels comme illustré dans la figure 1.3 suivante [5] [6] :

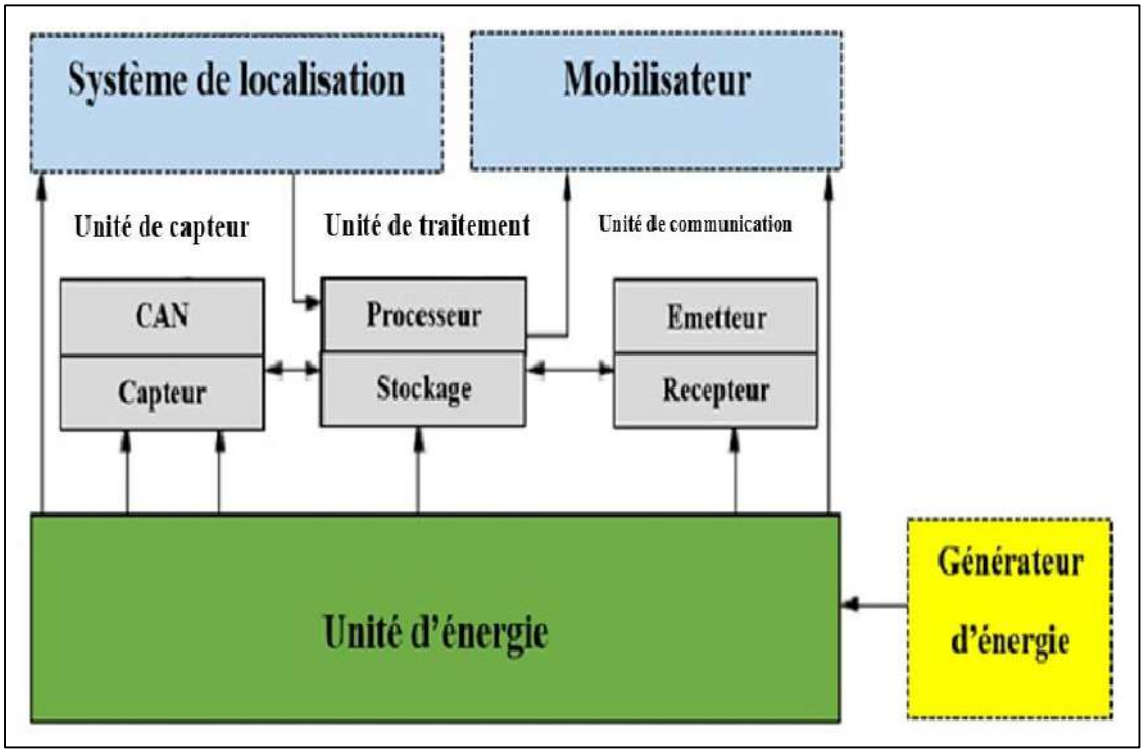


Figure 1.3. *Architecture interne d'un capteur sans fil*.

- ✓ **L'unité traitement :** Composée d'un microcontrôleur ; est le centre d'intelligence du capteur. Elle est responsable du contrôle du capteur, de l'exécution des protocoles de communication et des algorithmes de traitement des signaux sur les données captées tous ces opérations, ce fait à faible consommation énergétique. [6]
- ✓ **L'unité de communication :** Doté d'une interface radio opérant sur une courte distance, le sous-système radio assure la communication avec le monde extérieur. Il est composé d'un émetteur/récepteur. [6]
- ✓ **L'unité d'énergie :** L'alimentation est responsable de la fourniture d'énergie aux autres entités, intègre une batterie ainsi qu'un convertisseur de tension continue.

Ce convertisseur responsable de fourniture du tension constante aux autres entités du capteur et déterminé par ce fait même la durée de vie du capteur. [6]

- ✓ **L'unité de capteur :** C'est un bloc qui relie le nœud au monde physique est constitué d'un ensemble de capteurs, est responsable de l'observation et de la conversion des phénomènes physiques en signaux électriques. Les capteurs peuvent être analogiques ou numériques dépendamment du type de signal qu'ils génèrent sous l'effet du phénomène contrôlé. [6]

4. Les typologies des réseaux de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil est composé d'un ensemble des nœuds et des stations de base qui s'occupent de collecter les données des capteurs et de les transmettre à l'utilisateur via l'internet ou le satellite, il existe plusieurs topologies pour les réseaux de capteurs. [3]

Le choix de la topologie appropriée dépend du débit, distance de transmission de signal, la durée du vie de la batterie, les conditions d'environnement de transmission et le composant de nœuds capteurs. Les différentes topologies de réseau sont : Anneau, bus, arbre, étoile et maille. La figure 1.4 montre les différentes topologies. [7]

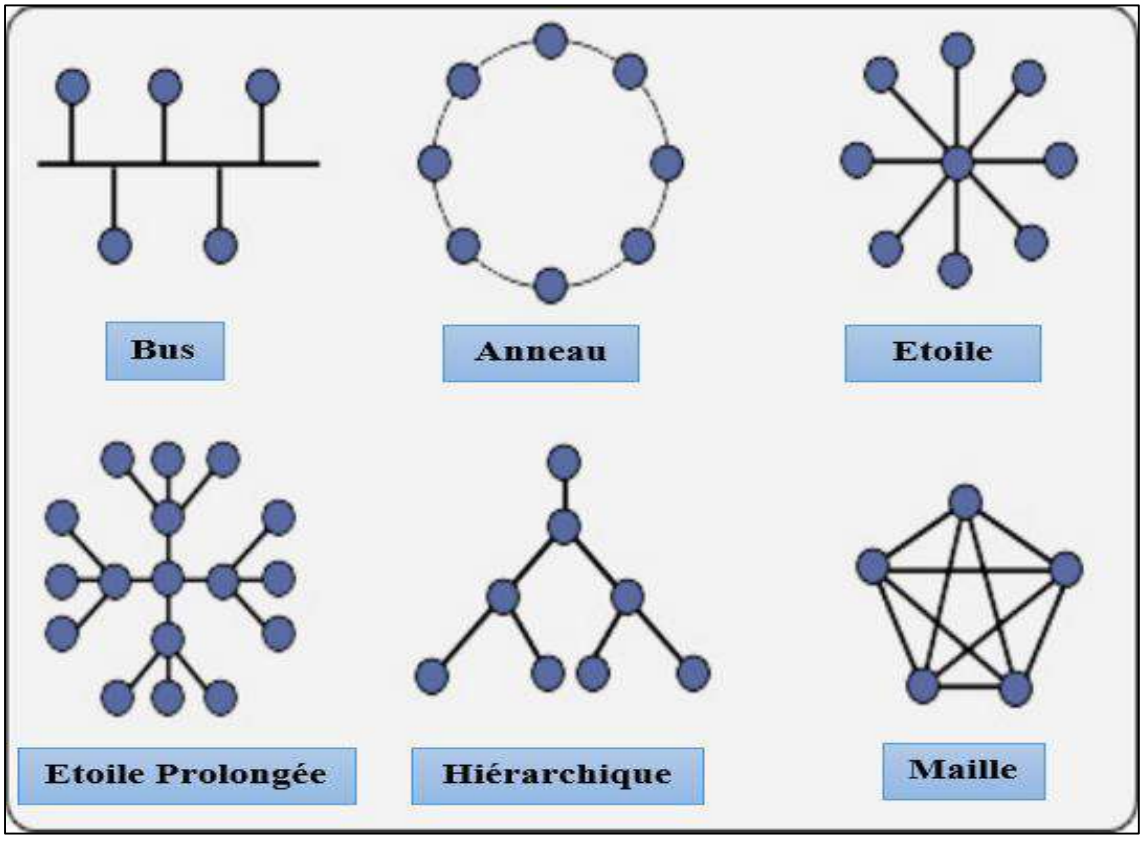


Figure 1.4. *Les différentes topologies de réseau de base.*

5. Technologies utilisés

Chaque technologie de réseau de capteur sans fil présente ses propres caractéristiques en termes de débit, de fréquence, de consommation, nombre de nœuds requis et de couverture radio. L'ensemble de ces technologies se base sur des architectures de communication, qui se déclinent en deux catégories :

- ✓ **Protocoles normalisés :** Parmi les standards de communication les plus utilisés, nous pouvons noter : Bluetooth, ZigBee et le nouveau standard DASH 7. Ces protocoles sont destinés à être partager, l'utilisation n'est pas dépendante du fournisseur des couches de communication (physique / liaison de données (MAC)).
- ✓ **Protocoles spécifiques propriétaires :** Le système de capteurs sans fil fourni par la société Micro-Strain à l'usage militaire, qui est un système d'acquisition de données haut débit. Ce système est basé sur le protocole IEEE 802.15.4 qui peut atteindre des couvertures radio entre 70 m et 300 m. Ces protocoles ne sont pas destinés à être partagés, mais l'utilisateur est dépendant des couches de communications du fournisseur. **[8]**

La figure 1.5 présente un classement des protocoles normalisés, en fonction de leur portée et de débit de communication.

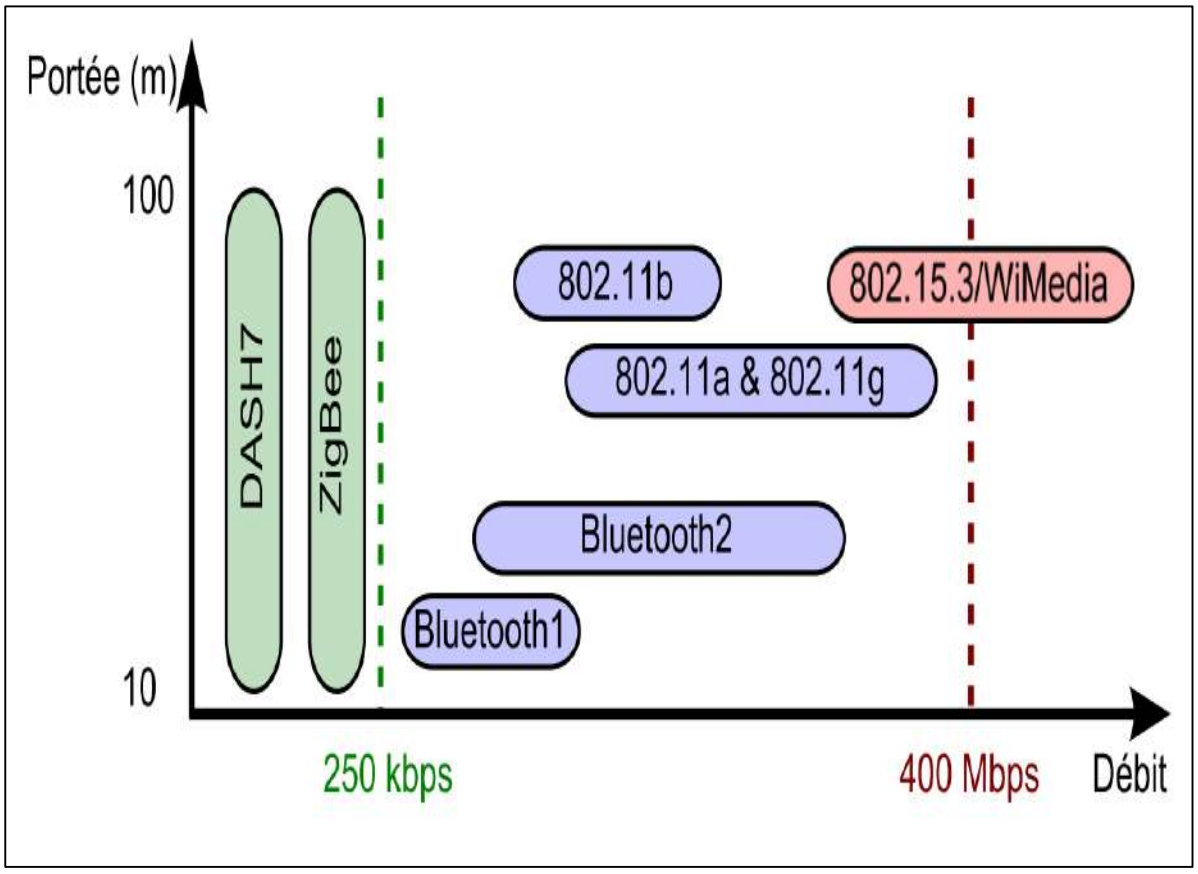


Figure 1.5. Classement des standards de communication.

5.1. *Bluetooth*

La norme Bluetooth a été conçue pour présenter une faible consommation et permettre de réduire le coût de conception des communications sans fil à courte distance. Originalement conçue comme une alternative aux liaisons câblées, le Bluetooth est utilisé pour connecter différents types d'équipements comme les périphériques informatiques tels que souris et clavier, ou bien audio (écouteur sans fil). **[8]**

5.2. *ZigBee*

Le standard ZigBee est basé sur une réutilisation de la couche physique de radio communication définie par le standard IEEE 802.15.4, en y rajoutant une couche réseau spécifique. La figure 1.6 présente les couches des standards ZigBee et IEEE 802.15.4.

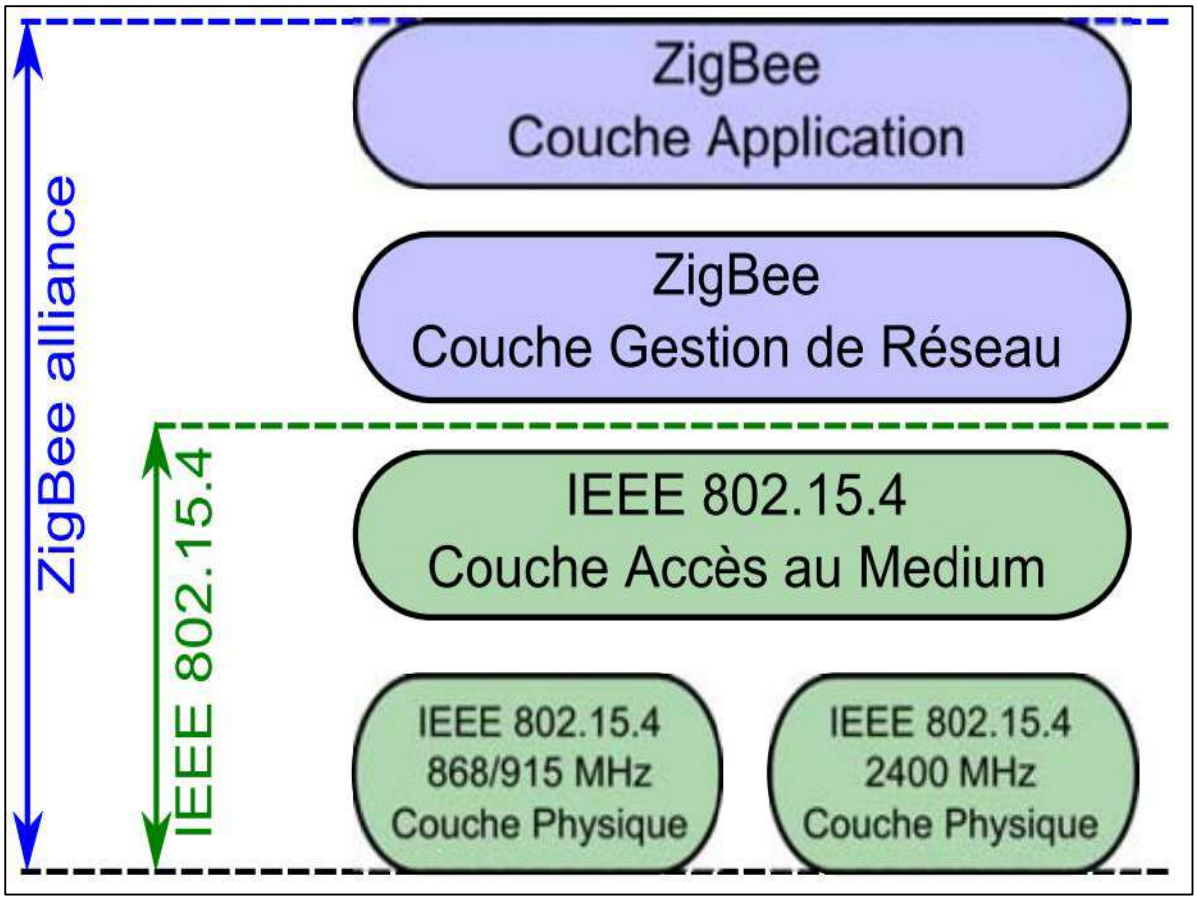


Figure 1.6. *Les couches du standard ZigBee.*

Nous remarquons que ce protocole exploite également la gamme de bande de fréquence ISM compris entre 2400 MHz et 2483.50 MHz, libre de droit d'exploitation. **[8]**

5.3. *DASH7*

DASH 7 est une norme de communication à très faible consommation pour les réseaux de capteurs sans fil. Originalement conçu pour un usage militaire, elle est maintenant proposée pour des applications commerciales. DASH 7 possède une portée de plus de 2 Km, une durée de vie de batterie de 10ans avec une capacité de maillage. DASH 7 est connu sous le nom ISO 18000-7. Cette technologie utilise les fréquences 433 MHZ, ce qui correspond à une longueur d'onde de 70 cm. Etant donné la fréquence utilisée, la difficulté d'usage de cette norme se situe dans la conception d'antennes compactes. **[8]**

5.4. *Comparaison entre les différents standards*

Le tableau 1.1 résume les performances des protocoles cités au-dessus, auxquels nous avons rajouté un produit industriel, *Micro-Strain*, basé sur le protocole ZigBee. **[8]**

Tableau 1.1. *Comparaison entre les différents standards*.

Caractéristiques	ZigBee	Bluetooth	DASH7	MicroStrain
Portée	100 m	10 m à 100 m	250 m à 2 km	70 m à 300 m
Débit binaire	250 kbit/s	1 Mbit/s	27.8 kbit/s	4 kbit/s
Fréquence	2.4 GHz	2.4 GHz	433 MHz	2.4 GHz
BP du canal	5 MHz	1 MHz	0.5 à 1.75 MHz	2 MHz
Nombre des nœuds	64000 *	7	quelques dizaines	quelques dizaines
Modulation	QPSK	GFSK	FSK / GFSK	QPSK
Déterministe	Non	Non	Non	Non
Consommation	Faible **	Moyenne	Très faible	Faible

* Valeur théorique. En pratique, c'est quelques dizaines de noeud.

** Si les capteurs sont interrogés ponctuellement.

6. Les protocoles MAC dans les WSN

MAC (Medium Access Control), c'est un protocole du mécanisme de contrôle lors de l'envoi d'un paquet et à l'écoute pour l'autre paquet. **[9]** Ce protocole est conçu pour le bas débit, courte distance, et les applications de communication de faible puissance telle que les réseaux de

capteurs sans fil (WSN). **[10]** Il présente quelque protocole MAC proposés pour les réseaux de capteurs sans fil selon leurs types. Il a identifié trois types :

- ✓ Les protocoles basés sur des séquences temporelles.
- ✓ Les protocoles basés sur un évitement de collision probabiliste.
- ✓ Les protocoles hybrides.

Il décrit aussi en résumé quelques protocoles MAC représentatifs de chacun de ces types. Á noter que ces protocoles sont les plus étudies dans la littérature et non pas forcément les plus performants, il s'agit de protocoles de base et parfois sujets à optimisation. **[11]**

6.1. *La méthode d'accès CSMA/CA*

La norme IEEE802.15.4 utilise le protocole CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) est une méthode d'accès au média. Elle est notamment utilisée par la norme 802.11 dite Wifi.

Dans CSMA/CA, les collisions ne peuvent pas être détecter, un nœud essaie d'éviter les collisions. Ceci à cause de l'effet d'aveuglement du médium sans fil (Near Far Effect) qui empêche une entité de recevoir quand elle est en train d'émettre. En CSMA-CA, à tout moment où un dispositif veut transmettre, il effectue d'abord une évaluation du canal (Clear Channel Assessment : CCA) afin de s'assurer que le canal n'est pas en cours d'utilisation par un autre périphérique. Ensuite le dispositif commence la transmission de son propre signal. La décision si un canal est libre ou non peut être baser sur la mesure de l'énergie spectrale du canal de fréquence d'intérêt ou de détecter le type de signal d'occupation. **[11]**

6.2. *La couche physique IEEE 802.15.4*

La couche physique a pour rôle de gérer le support physique sur lequel seront faites les transmissions. Elle définit les techniques par lesquelles les bits seront transformés en signaux analogiques et inversement.

La couche physique dans IEEE 802.15.4 offre les fonctionnalités suivantes :

- ✓ Gestion de l'activation et de la désactivation du module radio, la radio pourra prendre trois états différents : réception, émission et éteinte.
- ✓ La détection de la puissance du signal sur le canal (Energie Détection ED).
- ✓ La possibilité de remonter à la couche supérieure des informations sur la qualité du lien radio après réception d'une trame : LQI (Link Quality Indicator).

- ✓ La détection de l'occupation ou non du medium : CCA (Clear Channel Assessment).
- ✓ La selle d'un canal de transmission parmi les différents canaux disponible. **[12]**

6.3. *La couche MAC dans IEEE 802.15.4*

Cette couche offrira un mécanisme d'économie d'énergie, une des fonctionnalités les plus importantes dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous pouvons résumer ce mécanisme d'une manière très simple :

L'utilisation de la radio représentant le plus grand facteur de dépense énergétique doit être limiter au strict minimum en la gardant éteinte la majorité du temps.

La couche MAC offre aussi d'autres fonctionnalités de contrôle liées à :

- ✓ La gestion du réseau.
- ✓ La gestion des acquittements.
- ✓ La gestion de l'adressage (adresse IEEE 802.15.4 codé sur 64 bit et 16 bit).
- ✓ L'allocation et la gestion des slots dédiés.
- ✓ Le mécanisme de découverte de voisinage. **[12]**
- ✓ Etablissement des liaisons/topologies.
- ✓ Gère l'accès et le partage du canal : CSMA/CA.
- ✓ Détection et réception des trames de données. **[13]**

7. Les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil

Bien que la première application envisagée pour les RCSF a été dans le domaine militaire et donc une application typique est la surveillance de champ de bataille. Il y a un large domaine d'applications de réseaux de capteurs sans fil dans le secteur civil. Certaines de ces applications sont à l'intérieur ou à l'extérieur. **[1]**

7.1. *Application militaire*

Comme pour de nombreuses autres technologies, le domaine militaire a été le moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Actuellement, les RCSFs peuvent être une partie intégrante dans le commandement, le contrôle, la communication, la surveillance, la reconnaissance, etc.

7.2. *Application médicale*

Dans les systèmes de soins de santé et de bien être suivi, des nœuds biocapteurs peuvent être utilisés pour la surveillance des patients. Les nœuds de capteurs peuvent être intégrés sur ou dans le corps pour détecter des maladies cardiaques. Cette classe inclut des applications comme : fournir une interface d'aide pour les handicapés, collecter des informations physiologiques humaines de meilleure qualité, surveiller en permanence les malades et les médecins à l'intérieur de l'hôpital.

7.3. *Surveillance infantile*

Les systèmes sûrs de sommeil sont conçus pour surveiller un nourrisson tandis qu'il dort pour réduire le syndrome de mort subite des nourrissons dans beaucoup de pays.

7.4. *Divertissement*

De nos jours, des jouets ont été intégrés avec des capteurs de mouvement pour pouvoir déterminer leur emplacement et également quelques capteurs pour détecter des bruits d'environnement. **[7]**

7.5. *Applications agricoles*

Dans le domaine de l'agriculture, se rapport à l'approche du contrôle agricole et gestion basée sur la détection de produit chimique, biologique et l'environnemental directe. **[5]**

7.6. *Applications de surveillance de l'environnement*

L'utilisation des RCSF dans des applications environnementales est préoccupée par le changement climatique, le réchauffement global, la diminution des ressources naturelles, feux de forêts, tremblements de terre, détecter des fruits des produits toxiques.

7.7. *Applications dans l'espace intelligent*

L'une des applications RCSFs est la conception et le développement d'un espace intelligent de la maison (smart home environnement), ou un réseau de capteur sans fil peut être déployé pour satisfaire les besoins spécifiques des habitants comme le contrôle des différents equipements dans la maison . **[7]**

7.8. *Applications de Traçabilité et de Localisation*

Suite à une avalanche, il est nécessaire de localiser les victimes enterrées sous la neige en équipant les personnes susceptibles de se trouver dans des zones à risque par des capteurs. Ainsi, les ´équipes de sauvetage peuvent localiser plus facilement les victimes. Contrairement aux solutions de traçabilité et de localisation basées sur le système de GPS (Global Positionning System), les réseaux de capteurs peuvent être très utiles dans des endroits clos comme les mines par exemple.

La capacité de localisation (estimation de la position) est essentielle dans la plupart des applications de réseaux de capteurs sans fil. Dans les applications de surveillance de l'environnement comme : la surveillance de l'habitat des animaux, la surveillance de la qualité de l'eau et l'agriculture de précision. Les données de mesures ne sont rien sans une connaissance précise de l'endroit d'où les données sont obtenues. Par ailleurs, la disponibilité d'informations de localisation permet l'apparition de nouvelles applications telles que la gestion des stocks, la détection d'intrusion, le suivi de la circulation routière, la surveillance de la santé, etc.…

La localisation à une importance à cause de l'utilisation dans plusieurs domaines: Actuellement se déploient des services de localisation d'intérieur par *smartphone Android* exploitant la position d'antennes GSM et de points d'accès publics ou *hotspots* Wifi. Si ce support est, dans d'autres pays (USA, Japon), disponible dans les aéroports, il est permis d'envisager de coupler cette localisation avec des offres promotionnelles dans les grands magasins. Ceci permettrait d'orienter le client en fonction de ses besoins vers des produits spécifiques.

Le confort et les services à la personne : bien qu'abordé en dernier, ce secteur fourmille d'applications : dans la vie quotidienne, certaines questions reviennent très souvent. Parmi elles, on retrouve : « Où sont mes clés ? Mon téléphone portable ? La télécommande ...Je crois que je suis perdu : où suis-je ? …Mais où ai-je garé la voiture ?!! ». Bien entendu, certains de ces problèmes sont résolus par des technologies existantes. La technologie de RFID est également un outil souvent rencontré dans ce domaine. Le RFID se base sur l'utilisation de circuits miniaturisés ou *tags*, placés sur des unités à contrôler, et de lecteurs. Les *tags* peuvent être passifs ou actifs : dans le premier cas, l'énergie reçue par le biais du message du lecteur est utilisée pour alimenter le *tag* et lui permettre de répondre. Dans le second cas, le *tag* dispose d'une source d'énergie et peut donc communiquer sur de plus longues distances. **[11]**

La figure 1.7 illustre les différents globaux domaines d'application.

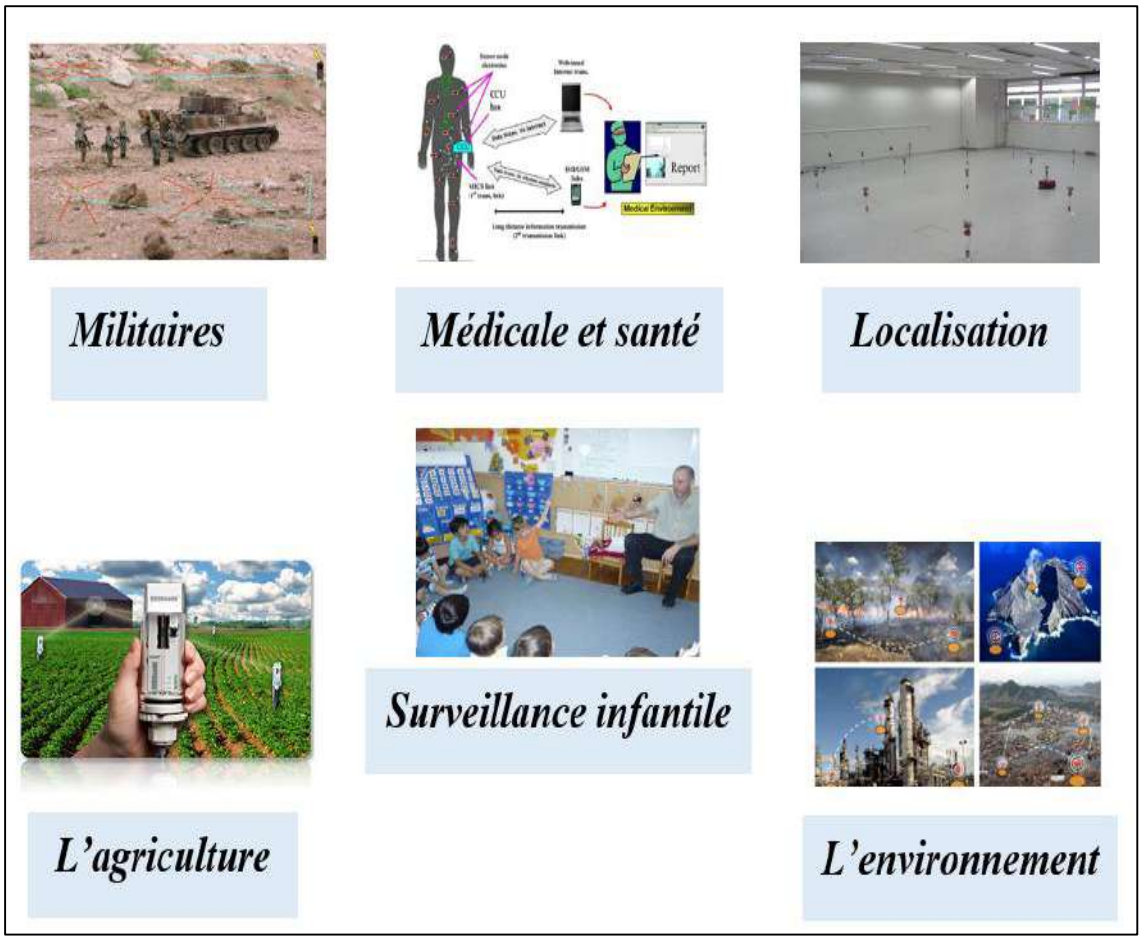


Figure 1.7. *Les domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil.*

8.8. Défis de recherche pour les réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil (WSNs) reçoivent actuellement une attention significative en raison de leur grand potentiel. Cependant, de tels systèmes sont très récents et beaucoup de défis de recherche existent sur cette nouvelle technologie :

8.1. Contraintes de temps réel

Les réseaux de capteurs sans fil traitent avec des environnements réels. La plupart des résultats obtenus sur les contraintes en temps réel concernant seulement le routage, alors que beaucoup d'autres fonctions doivent aussi respecter les contraintes en temps réel comme : la fusion et la transmission des données, la cible et la détection d'événements, la classification, le traitement des requêtes et la sécurité…etc.

8.2. *Gestion de l'alimentation*

Le déploiement à moindre cout est l'avantage le plus important des réseaux de capteurs sans fil. Cependant, le contrainte d'énergie de sera probablement pas résolus à court terme du fait du progrès lent dans le développement de la capacité des batteries.

8.3. *Sécurité et confidentialité*

Malgré les efforts consacrés et les projets réalisés pour sécuriser les RCSFs, la sécurité reste un domaine vaste et difficile à maitriser. Dans la plupart des applications, les capteurs sont obligés de fournir des données cryptées ou bien des authentifications aux données qu'ils fournissent pour éviter qu'un intrus.

8.4. *Technique d'analyse*

Il est nécessaire d'élaborer une approche scientifique pour les systèmes qui peuvent être conçus et analysés avant qu'ils ne soient déployés. Les applications des RCSFs incluent plusieurs domaines importants, tels que la surveillance des zones critiques, le domaine militaire, la surveillance des états de structures des ponts ou des bâtiments, la prévention des feux de forêt, la localisation dans les réseaux de capteurs sans fil. **[37]**

Tous ces thèmes sont des domaines de recherche actifs. Dans la suite, nous nous intéresserons particulièrement aux problèmes de la localisation.

9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil ainsi que leurs applications dans les différents domaines de la vie. Parmi ces applications, nous nous intéressons dans notre étude aux applications liées au problème de localisation qui sera le sujet de notre prochain chapitre.

CHAPITRE 2

PRINCIPES D'ESTIMATION DES DISTANCES DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

1. Introduction

La capacité de localisation (estimation de la position) est essentielle dans la plupart des applications de réseaux de capteurs sans fil. Dans ces réseaux, on a besoin d'une corrélation entre les données mesures et la position de la mesure. Par ailleurs, la disponibilité d'informations de localisation permet l'apparition de nouvelles applications telles que la gestion des stocks, la détection d'intrusion, le suivi de la circulation routière, la surveillance de la santé …. etc. La plupart des procédés employés pour déterminer une position sont basés sur des calculs géométriques comme la triangulation (en mesurant des angles par rapport à des points fixes ou des nœuds connaissant leur position) et la trilatération (en mesurant les distances entre les nœuds). Pour connaître la distance entre deux nœuds, plusieurs techniques peuvent être utiliser, comme la synchronisation, la puissance de signal reçu ainsi que les caractéristiques physiques de l'onde porteuse. D'autres approches, comme les caractéristiques du signal radio reçu et l'angle de l'arrivée peuvent être également appliquer pour le calcul de position.

Les techniques de localisation dans les RCSFs sont utilisées pour estimer l'emplacement des capteurs sans position connu auparavant dans le réseau en utilisant les informations de position de quelques capteurs spécifiques dans le réseau et leurs inter mesures tels que : la distance, le décalage horaire d'arrivée, l'angle d'arrivée et l'indicateur de signal reçue RSSI. Les capteurs avec les informations de localisation, approprie connus, sont appelés ancres ou références et leur emplacement peut être obtenu en utilisant un système de positionnement global (GPS), ou bien en installant des points d'ancrage à des points avec des coordonnées connues. **[14]**

2. Objectif de localisation

La localisation dans les réseaux de capteurs déployés de manière aléatoire consiste à déterminer les coordonnées géographiques des différents capteurs. La localisation des nœuds est nécessaire, non seulement pour localiser les différents évènements survenus dans la zone surveillée, mais aussi pour le développement de protocoles de routage de l'information récoltée. Pour la couverture de la zone d'intérêt, pour l'agrégation des données, etc. Elle est la première tâche exécutée par les nœuds après leur déploiement. La connaissance des positions des capteurs dans l'environnement surveillé est souvent indispensable pour une grande majorité

des applications (militaires, suivis des animaux,...), afin de pouvoir déterminer l'origine des événements détectés. « Où ? » est la question qui suit immédiatement la détection d'un événement (par exemple, où est le feu ?). En outre, la localisation peut être utiliser dans les protocoles de routage géographique dans les réseaux à grande échelle, en transmettant les données seulement dans la direction de la destination.

3. Définition

La localisation est un procédé permettant de positionner un objet sur un plan ou une carte géographique, cette opération est réalisée à l'aide d'un terminal capable d'être localiser en temps réel ou de façon différée. Les positions enregistrées peuvent être stocker au sein du terminal et être extraites postérieurement, ou être transmises en temps réel vers une plateforme logiciel de localisation. La transmission temps réel nécessite un terminal équipé d'un moyen de télécommunication qui permet d'envoyer les positions à des intervalles réguliers. **[21]**

4. Propriétés d'un système de localisation

Un ensemble de caractéristiques (critères) permettent de comparer les systèmes de localisation. Les caractéristiques plus importantes sont les suivantes :

- ✓ Une technique d'estimation de position par exemple la trilatération ou la triangulation.
- ✓ Un repère qui permet d'obtenir des positions et qui les organise de façon cohérente. Trois types de position sont observés :
  - ➢ Les positions absolues renseignent sur la position réelle de l'objet sur le globe terrestre, longitude et l'attitude, ou dans l'espace.
  - ➢ Les positions relatives indiquent juste une direction par rapport à un voisinage donné à droite au bout de la rue par exemple.
  - ➢ Les positions symboliques désignent par exemple une salle, un espace particulier.
- ✓ Une précision de position : une position peut aller d'un point dans le cas d'une grande précision à une surface (ou volume), si la précision de position est moins importante.
- ✓ Une architecture particulière : un système de positionnement en intérieur dans un bâtiment par exemple ne possède pas les mêmes contraintes qu'un système de localisation d'extérieur.
- ✓ Un cout - matériel, infrastructure. **[14]**

La figure 2.1 illustre la décomposition du système de localisation en sous-système et on s'intéresse plus au système d'estimation de distance.

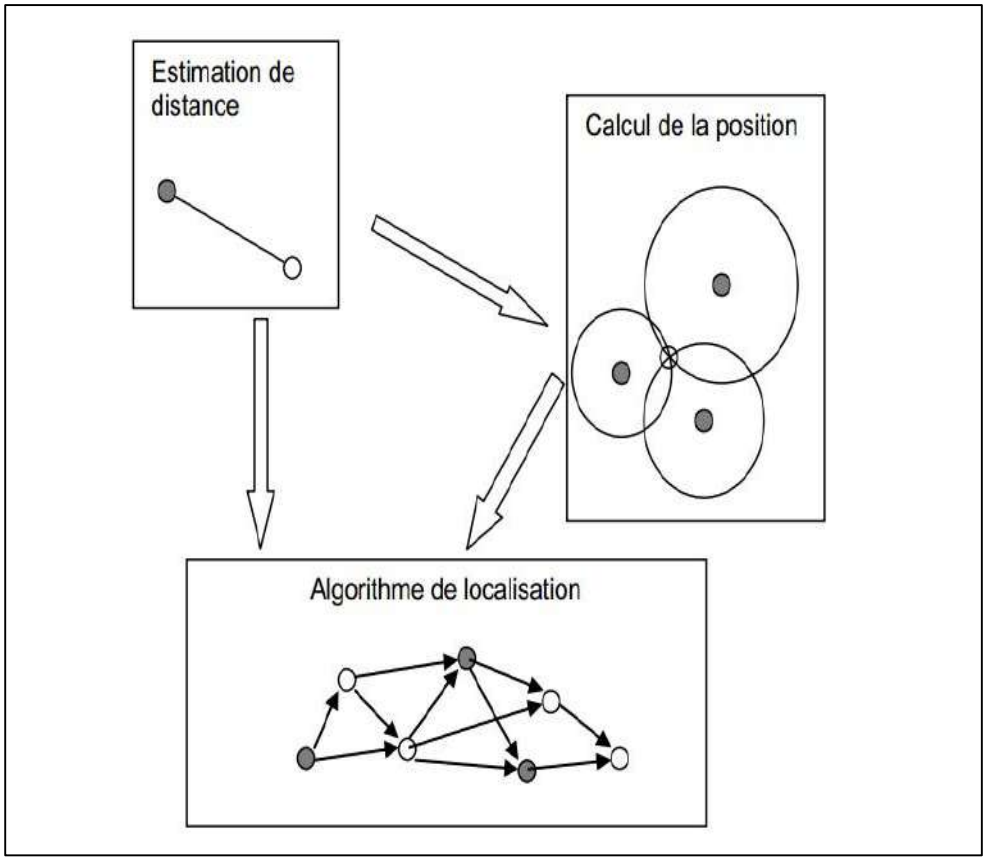


Figure 2.1. *Composition d'un système de localisation.* **[21]**

5. Estimation de distance / angle

La fondation de nombreuses techniques de localisation est l'estimation de la distance physique entre deux nœuds de capteurs. Les estimations sont obtenues par des mesures de certaine caractéristique des signaux échangés entre les capteurs, compris entre le temps de propagation du signal, l'intensité des signaux, ou l'angle d'arrivée, voici les principales méthodes d'estimations des distances. **[15]**

5.1. *Mesure du temps d'arrivée (ToA)*

Le concept derrière la méthode de temps d'arrivée (*ToA*), appelée aussi méthode de temps de vol) est que la distance entre l'émetteur et le récepteur d'un signal peut être déterminer en utilisant la mesurée de temps de propagation de signal et la vitesse de signal qui est connue. Par exemple la vitesse d'une onde sonneur **(**343 m/s) dans (20 °C), autrement dit, un signal sonore dure environ 30 ms pour voyager sur une distance de 10 m. En revanche, un signal radio se

déplace à la vitesse de la lumière (environ 300 km / s), autrement dit, le signal nécessite seulement environ 30 ns pour voyager sur 10m. La conséquence est que les mesures de distance par radio nécessitent des horloges à haute résolution. En ajoutant au coût et la complexité d'un réseau de capteurs. Cette approche utilisée par les radars civils et militaires.

Le temps d'aller de la méthode (ToA) mesure le temps d'arrivée de propagation, c'est la différence entre le temps d'émission et le temps de réception du signal. La synchronisation nécessite une grande précision des horloges de l'émetteur et de récepteur. Figure 2.2 (a).

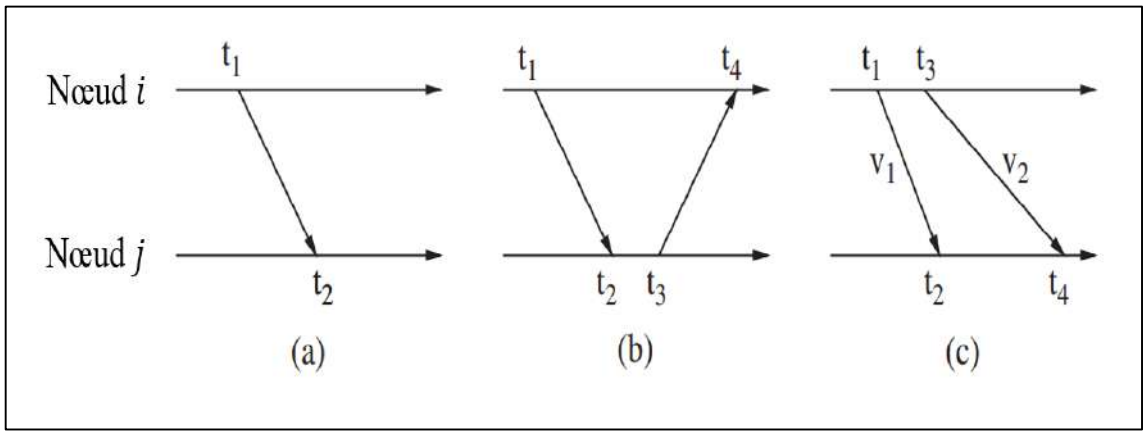


Figure 2.2. *(a : ToA aller, b : ToA aller-retour, c : TDoA).*

Par conséquent, on peut mesurer le temps d'aller de la méthode (ToA) du signal propagé voir la figure 2.2 (a). On résume, pour la méthode des mesures de temps d'aller, la distance entre deux nœuds ***i*** et ***j*** peut être déterminer comme suit :

$$\mathbf{dist_{ij}} = (\mathbf{t_2} - \mathbf{t_1}) \times \mathbf{v} \qquad \textit{(EQ : 2.1)}$$

Où $\mathbf{t_1}$ et $\mathbf{t_2}$ sont des instants d'émission et de réception du signal (mesuré à l'émetteur, et récepteur, respectivement) et **v** est la vitesse du signal. De même, pour l'approche des mesures de temps d'aller-retour, la figure 2.2 (b), alors la distance est calculée comme suit :

$$\mathbf{dist_{ij}} = \frac{(\mathbf{t_4} - \mathbf{t_1}) - (\mathbf{t_3} - \mathbf{t_2})}{\mathbf{2}} \times \mathbf{v} \qquad \textit{(EQ : 2.2)}$$

Où $\mathbf{t_3}$ et $\mathbf{t_4}$ sont les instants d'émission et de réception du signal de réponse. Notez qu'avec La méthode de temps d'aller, le nœud récepteur calcule sa position. Alors que, dans l'approche de mesure de temps d'aller-retour, le nœud émetteur calcule l'emplacement du récepteur. Par conséquent, un troisième message sera nécessaire dans l'approche bidirectionnelle pour

informer le destinataire de son emplacement. [16] Les radars civils et militaires ou la proposition GPS-free utilisent cette approche. [17]

Les Avantages

- ✓ Donne une grande précision pour la localisation.
- ✓ Peut être adapter à un multiple d'applications. [18]

Les inconvénients

- ✓ 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. [18]

5.2. *Mesure de la différence des temps d'arrivée (TDoA)*

La différence de temps d'arrivée (TDoA) approche utilise deux signaux qui voyagent avec des vitesses différentes, la figure 2.1 (c). Le récepteur alors mesure sa position à l'approche (ToA). Par exemple, le premier signal peut être un signal radio émis à l'instant $\mathbf{t_1}$ et reçu à$\mathbf{t_2}$, suivi par un signal acoustique (immédiatement ou après un délai fixé l'intervalle d'attendre $\boldsymbol{t_{Att} = t_3 - t_1}$). Par conséquent, le récepteur peut déterminer la distance en tant que :

$$\mathbf{dist} = (\mathbf{v_1} - \mathbf{v_2}) \times (\mathbf{t_4} - \mathbf{t_2} - \mathbf{t_{Att}}) \qquad \textit{(EQ : 2.3)}$$

Où $\mathbf{v_1}$et $\mathbf{v_2}$ sont les vitesses de signal radio et acoustique respectivement. Le $\boldsymbol{d_i}$ le retard de propagation du signal dépend de la distance entre l'émetteur i et le récepteur j. L'analyse de corrélation peut alors fournir un retard de temps $\boldsymbol{\delta = d_i - d_j}$ qui correspond à la différence de longueur de trajet pour les récepteurs $\boldsymbol{i}$ et **j**, $\boldsymbol{\delta}$ la différence entre les deux. [16]

Les Avantages

- ✓ Donne une grande précision pour la localisation.
- ✓ Peut-être utiliser dans plusieurs domaines d'applications. [18]

Les inconvénients

- ✓ 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. [18]

5.3. *Mesure de 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 constituant le récepteur. Dans le cas d'un réseau d'antennes linéaire et uniforme, l'information sur l'AoA est obtenue en mesurant la TDoA $\boldsymbol{\Delta\tau}$ des signaux reçus sur les éléments constituant le réseau. Par ailleurs, quand la distance entre l'émetteur et le récepteur est suffisamment importante, il est possible de considérer que les fronts d'onde qui arrivent sur l'antenne sont planaires comme indiqué par la figure 2.3:

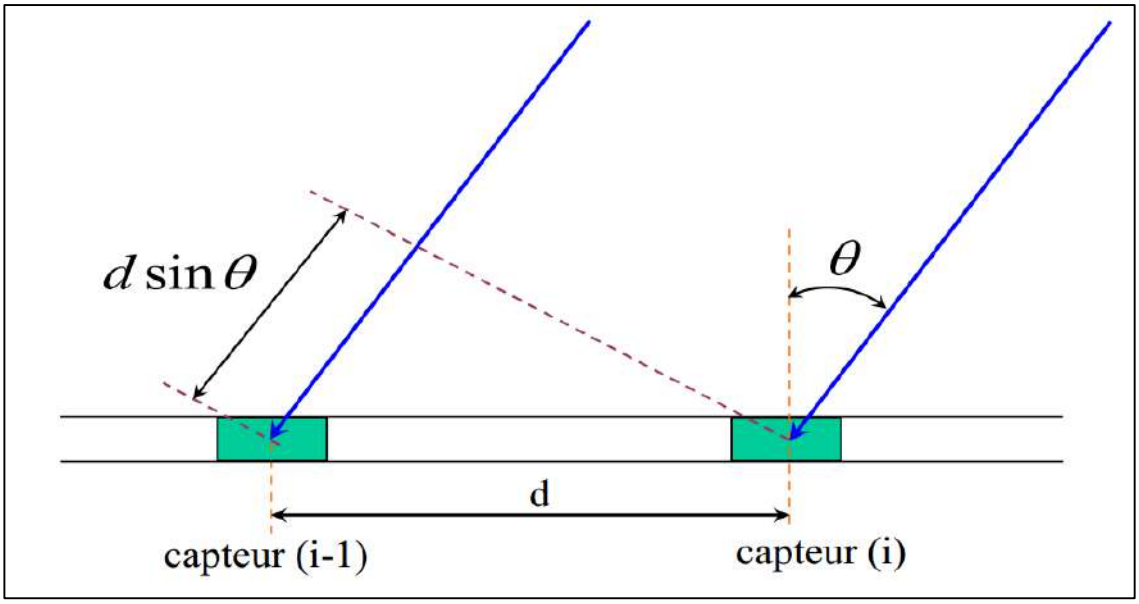


Figure 2.3. *Mesure de l'AoA par un réseau de capteurs.*

Ce faisant, il est possible de calculer la TDoA $\boldsymbol{\Delta\tau}$ par la relation suivante :

$$\boldsymbol{\Delta\tau = \frac{d \sin(\theta)}{c}} \qquad \textbf{(EQ : 2.4)}$$

Où $\boldsymbol{d}$ est la distance entre deux éléments consécutifs du réseau, $\boldsymbol{\theta}$ est l'angle d'incidence du signal reçu et $\boldsymbol{c}$ représente la célérité de la lumière. [19] L'AoA est également employée dans tous les systèmes de radar et GSM et la navigation aérienne permet de déterminer [17] la direction.

Les Avantages

✓ Ne nécessite que deux nœuds ancres pour la localisation. **[18]**

Les inconvénients

✓ 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. **[18]**

5.4. *Mesure de RSSI (Indicateur de puissance du signal reçu)*

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 $\mathbf{P_t}$:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t \times G_r \times \frac{1}{L} \times \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 R^2} \qquad \textit{(EQ : 2.5)}$$

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 $\boldsymbol{\lambda}$ intervient dans la formule. Ce modèle fait donc l'hypothèse d'une répartition uniforme de l'énergie sur des sphères concentriques. **[20]**

Il existe un autre modèle d'équation modèle de **Shadowing,** ce modèle comporte deux parties :

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 *(EQ : 2.6).*

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^{\beta} \qquad \textit{(EQ : 2.6)}$$

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 *(EQ : 2.7)* où $\boldsymbol{\beta}$ est un coefficient d'atténuation empirique.

$$\left[\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)}\right]_{db} = -10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{db} \qquad (EQ : 2.7)$$

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 [20] de la source.

Les Avantages

- ✓ Simple à mettre en œuvre, la plupart des nœuds possède l'information sur RSSI.
- ✓ Non sensible à la synchronisation. [18]
- ✓ Faible coût car tous les nœuds sont déjà équipés de dispositif de communication sans fil.

Les inconvénients

- ✓ 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. [18]

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

Tableau 2.1. *Comparaison entre les méthodes d'estimation de distance.* [21]

Méthode	Distance Maximale	Précision	Matériel supplémentaire	Défis
RSSI	La portée	2 à 4 m	Rien	Variations du RSSI, Interférences
ToA	La portée	2 à 3 cm	Rien	Synchronisation des nœuds
TDoA	2 à 10 m (Quelques mètres)	2 à 3 cm	Capteur à ultrason	La distance maximale
AoA	La portée	Quelques degrés (5°)	Un ensemble de récepteurs	Travailler avec des nœuds de petite taille

Notation

Pour quantifier la précision des différentes méthodes, nous utilisons la RMSE ou racine de l'erreur quadratique moyenne sur la distance.

On calcule la RMSE entre les distances estimées $\hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{ij}}$ et les distances réelles $\mathbf{d}_{\mathbf{ij}}$ par :

$$\mathbf{E}_{\mathbf{RMSE}}^{\mathbf{dist}} = \sqrt{\frac{\sum_{\mathbf{i,j}\in(\mathbf{1,N})}(\hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{ij}}-\mathbf{d}_{\mathbf{ij}})^{\mathbf{2}}}{\mathbf{N}}} \qquad \textbf{\textit{(EQ : 2.8)}}$$

N : est le nombre des nœuds dans le réseau.

$\hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{ij}}$: La distance estimée entre un capteur **i** et capteur **j**.

$\mathbf{d}_{\mathbf{ij}}$: La distance réelle entre le capteur **i** et capteur **j**.

6. Méthodes de localisation

Les méthodes généralement utilisées pour la localisation d'un objet sont : la Trilatération, la triangulation, la multilatération…..etc.

6.1. Trilatération

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

Soient trois balises $\mathbf{B_1}, \mathbf{B_2}$ et $\mathbf{B_3}$, **I** le nœud que l'on désire localiser. L'exécution du protocole de mesure de distance a produit le triplet $(\boldsymbol{d_1}, \boldsymbol{d_2}, \boldsymbol{d_3})$ et les échanges de données ont permi au nœud **I** de connaître les positions des balises. L'équation *(EQ : 2.9)* décrit la relation entre $\boldsymbol{B_1}, \boldsymbol{B_2}, \boldsymbol{B_3}$ et $\boldsymbol{I}$.

$$\begin{cases} (\mathbf{x}-\mathbf{x_1})^{\mathbf{2}}+(\mathbf{y}-\mathbf{y_1})^{\mathbf{2}}=\mathbf{d_1} \\ (\mathbf{x}-\mathbf{x_2})^{\mathbf{2}}+(\mathbf{y}-\mathbf{y_2})^{\mathbf{2}}=\mathbf{d_2} \\ (\mathbf{x}-\mathbf{x_3})^{\mathbf{2}}+(\mathbf{y}-\mathbf{y_3})^{\mathbf{2}}=\mathbf{d_3} \end{cases} \qquad \textbf{\textit{(EQ : 2.9)}}$$

La position recherchée se trouve donc à l'intersection des trois cercles $C_1(B_1, d_1)$, $C_2(B_2, d_2)$ et$C_3(B_3, d_3)$. Ayant respectivement les rayons $\mathbf{d_1}$, $\mathbf{d_2}$ et$\mathbf{d_3}$. **[16]**

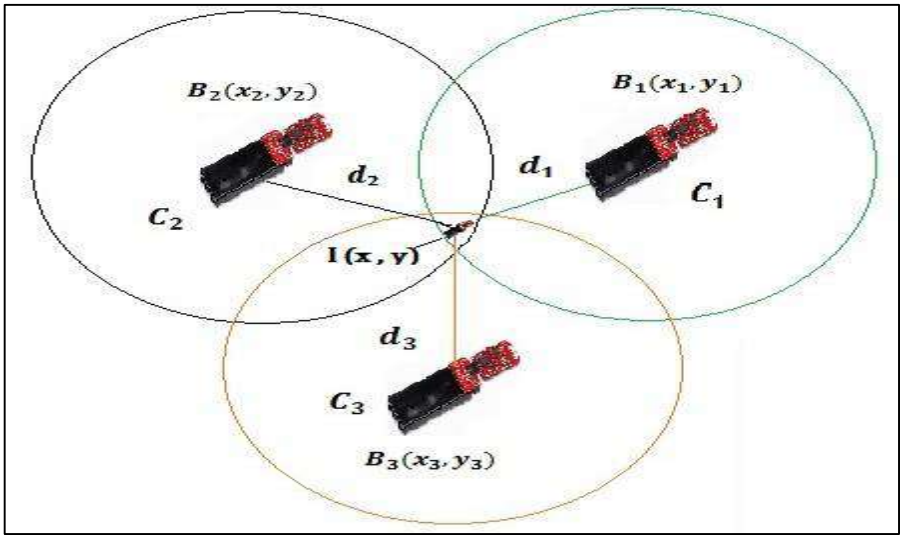


Figure 2.4. *Trilatération (C_1, C_2, C_3 : Des ancres, I : Nœud à localiser).*

6.2. *Triangulation*

L'angle d'incidence du signal émis par le nœud **I** peut-être utiliser pour retrouver sa position. Considérons deux balises $B_1(x_1, y_1)$ et $B_2(x_2, y_2)$ à portée du nœud $I(x, y)$. Chacune dispose des moyens matériels de mesurer l'angle sous lequel elle reçoit le signal de nœud **I**. Soient **α** et **β** ces deux angles.

Le nœud **I** se retrouve à l'intersection des droites passantes par les couples (B_1, I) et (B_2, I). En définissant un nouveau repère dont l'origine est $\mathbf{B_1}$ et où $(\mathbf{B_1}, \mathbf{B_2})$ se confond avec l'axe des ordonnées, le rapprochement des équations des droites conduit à l'équation *(EQ : 2.10)* de la position de nœud **I**. **[16]**

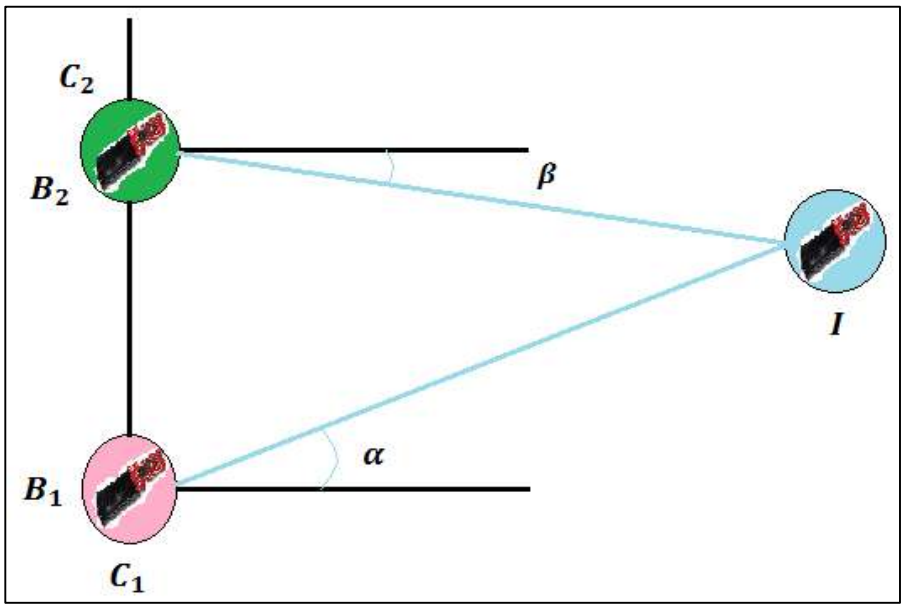


Figure 2.5. *Triangulation (C_1, C_2 : Des ancres, I : Nœud à localiser).*

$$I\left(\frac{y_2}{\tan\alpha+\tan\beta}\ ;\frac{y_2\tan\alpha}{\tan\alpha+\tan\beta}\right) \qquad \textit{(EQ : 2.10)}$$

7. Algorithme de localisation

Il est très intéressant de les découvrir même si dans la pratique c'est impossible de tenir compte de tous ces algorithmes lors d'une localisation. Néanmoins, il peut être intéressant de les garder à l'esprit afin de pouvoir rendre un algorithme choisi meilleure selon telle ou telle algorithme.

8. Etat de l'art

La mesure du RSSI peut être effectuer par chaque capteur durant la réception de paquets de donnés sans impacter la bande passante ou l'énergie. De plus, cette mesure paraît intuitive : plus le signal reçu est fort, plus le voisin est proche, moins ce signal est puissant plus le voisin est éloigné. Pour obtenir une métrique de RSSI stable et utilisable, il est nécessaire de :

- ✓ Mesurer de RSSI sur une fréquence optimale.
- ✓ Mesurer le RSS sur un temps assez long pour lisser les fluctuations.
- ✓ Calibrer les capteurs du réseau afin d'obtenir une puissance optimale et une sensibilité d'émission comparable.
- ✓ Être dans un milieu sans trop d'interférences extérieures (Outdoor), objets mobiles traversant la zone de déploiement, pluie, portes, etc.

Cet ensemble de contraintes est, selon nous, incompatible avec une grande majorité des réseaux de capteurs pour les raisons suivantes :

- ✓ le saut de fréquences n'est pas disponible sur l'ensemble des capteurs du marché.
- ✓ Le temps nécessaire à lisser les fluctuations va dépendre de la dynamique de l'environnement et entraînera nécessairement une latence dans la localisation et un surcoût énergétique.
- ✓ **[25]** a réalisé les conditions favorable avec une puissance d'émission de -16 dBm et le canal 0 et il a confirmé que le RSSI peut être utilisé qu'à l'extérieur et dans un environnement dégagé sans obstacle et cherche toujours à réduire l'erreur d'estimation des distances afin d'avoir une meilleure localisation et il a atteint à une erreur d'estimation de distance de **0.468 mètre**.

- ✓ On se base sur l'équation du bilan de liaison entre un émetteur et récepteur qui a été validé empiriquement par **[25]** pour le cas des capteurs MSP 430 et sur des modèles mathématiques d'environnement ; la question posé est la suivante : « Existe-il un canal de transmission et une puissance d'émission optimale pour avoir une faible erreur d'estimation des distances entre les capteurs à portée radio ? ».

Les capteurs de Texas Instrument utilisés dans nos expérimentations n'ont pas de module de mesure de distance inter capteurs. Les distances seront estimées à partir des indicateurs de qualité des communications radios qui fournissent une indication sur le signal, le RSSI en cherchant le meilleur canal de transmission et la puissance d'émission fiable qui donne une mesure stable de ce dernier. **[22][23][24][25]**

9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un certain nombre de techniques de mesure de distance ainsi que les algorithmes comme Range-Free et Range-Based utilisés dans la localisation des capteurs. Suite à cela, nous avons fixé notre choix sur la technique de mesure de l'indicateur de la puissance du signal reçu, afin d'estimer les distances, il faut déterminer la bande de fréquence optimale et la bonne puissance d'émission, pour avoir une bonne précision sur la localisation.

CHAPITRE 3

LA PERFORMANCE D'ESTIMATION DES DISTANCES DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

1. Introduction

La localisation d'un capteur dans son environnement de déploiement nécessite la mesure des distances qui le sépare des capteurs ancres. De nombreuses études se basent sur la puissance de signal reçu (**RSS**) comme métrique pour estimer la distance entre deux capteurs, car chaque paquet reçu contient une information sur l'indicateur de la perte de puissance du signal reçu (**RSSI**) dans le composant radio et ils ont confirmé que le RSSI peut être utiliser qu'à l'extérieur et dans un environnement dégagé sans obstacle, on cherche toujours à réduire l'erreur d'estimation des distances, afin d'avoir une meilleure localisation. **[22] [25]**

Pour avoir une très bonne précision d'estimation, des positions des capteurs dans leur champ de déploiement, il faut avoir une estimation de distance précise, nous nous basons à la fois, sur des études et les expérimentations précédentes **[26]**. Donc on utilise le RSSI comme métrique d'estimation des distances dans un milieu extérieur dégagé et on se base sur l'équation du bilan de liaison *(EQ :2.5),* qui a été validé empiriquement par **[25]** et sur des modèles mathématiques d'environnement ; la question posé est la suivante : « Existe-il un canal et une puissance de transmission optimale pour avoir une faible erreur d'estimation des distances entre les capteurs à portée radio ? ». **[25][27]**

Notre contribution est de trouver le bon canal de transmission parmi les seize canaux utilisés par la bande ISM, ainsi que la puissance optimal de transmission qui nous permet d'estimer les distances avec une faible erreur pour le cas des capteurs MSP 430-RF2500.

Des expériences vont être réaliser avec différentes fréquences et puissances de transmission pour voir l'évolution de l'erreur sur l'estimation des distances en fonction de ces deux paramètres, afin de choisir le bon canal de fréquence et la puissance de transmission optimale.

Nos résultats sont comparer et valider par rapport à l'inverse de la fonction du bilan de liaison ; d=f(RSSI) qui a été validé par **[25]** pour les capteurs MSP 430 dans un milieu extérieur avec une erreur d'estimation des distances de 0.468 mètre.

2. Plan de l'expérience

Le plan d'expérience définit les questions auxquelles les résultats de l'expérience sont supposés répondre, ainsi que les paramètres de réglage qui l'on doit supposer pour avoir les résultats souhaité à obtenir.

La figure 3.1 montre le plan global de l'expérience.

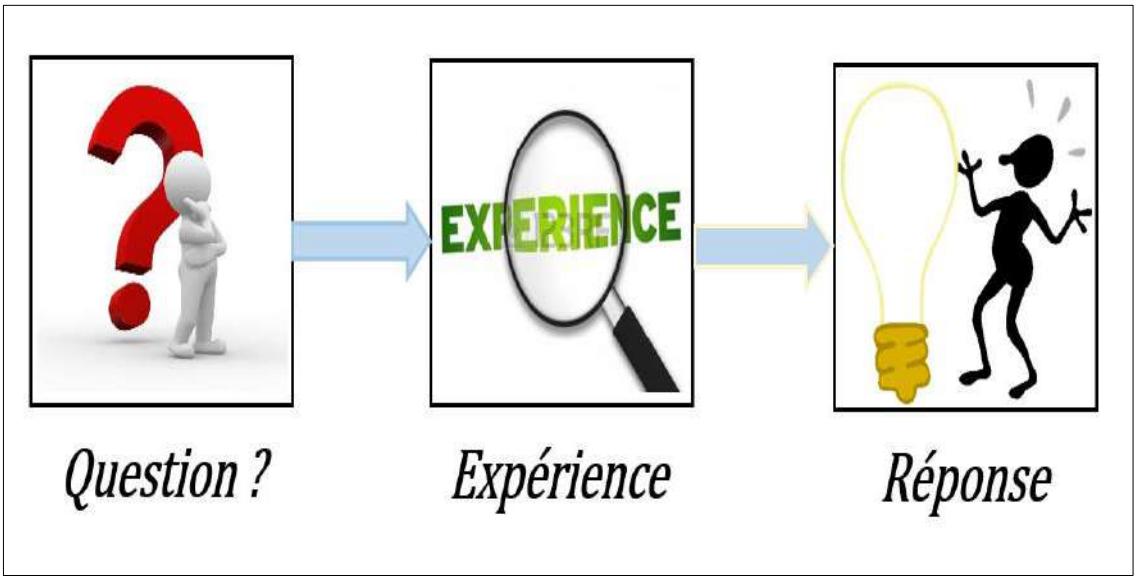


Figure 3.1. *Plan de l'expérience.*

2.1. *Définitions et concepts*

Avant que les mesures commencent ; deux capteurs ont été placés dans des positions prédéfinies. Les distances entre les deux capteurs sont mesurées avec un mètre à ruban, un autre capteur est branché à un ordinateur hôte, ce capteur appelé (*Sink)*. Les deux capteurs commencent la diffusion des signaux radio contenant l'information du **RSSI** échangée entre eux vers le capteur *Sink*, cette expérience doit être répéter plusieurs fois. On possède un capteur fixe et l'autre sera déplacé à différents distances prédéterminées.

2.2. *Buts et hypothèses*

Le but de nos expériences, est de trouver une fréquence et une puissance fiable pour avoir une bonne précision sur l'estimation des distances. Dans ce contexte, quel est le bon canal de fréquence ? Est-ce-que le choix de la puissance influe sur la précision ?

Avant de commencer les expériences, nous commençons par un ensemble d'hypothèses basées sur l'intuition et sur les données fournies par les travaux et les expérimentations précédentes :

- ✓ La localisation utilisant le RSSI comme métrique d'estimation des distances dans un environnement fermé n'est pas fiable. **[28]**
- ✓ La mesure de l'indicateur de puissance du signal reçue (RSSI) dans un milieu dégagé sans aucun obstacle, peut être utiliser comme métrique pour la localisation. **[25]**

- ✓ Pour avoir une bonne estimation des distances, il faut mettre les deux capteurs Face-à-face : l'angle entre les antennes des deux capteurs est (0°). [27]
- ✓ Les modèles mathématiques qui expriment l'évolution de la puissance du signal reçu en fonction de la distance qui sera utilisé. [16]

$$\mathbf{P_{rssi}} = \left(\frac{\lambda}{4*\pi*r}\right)^2 \mathbf{GeGrPe} \qquad \textit{(EQ : 3.1)}[18]$$

$$\mathbf{P_{rssi}\,(dBm)} = -\mathbf{20\log(d) - 65} \qquad \textit{(EQ : 3.2)}[25]$$

3. Expérimentation

Cette section définit le matériel et les logiciels utilisés, ainsi que la technique de programmation des capteurs, suivis par une méthode de décomposition de la bande ISM, avec un choix de variété des puissances, et nous présentons les scénarios des expérimentations ainsi que les conditions dans lesquelles elles ont été effectuées.

3.1. *Présentation du matériel*

Nos expériences ont été réalisées par des capteurs MSP430 de Texas Instruments conçus spécialement pour l'utilisation dans des réseaux de capteurs sans fil ; leurs principales avantages est leurs tailles réduites, leur très faible consommation électrique, ce qui permet une grande liberté de mouvement par rapport aux nœuds filaires. Le capteur MSP430 est Construit autour d'un CPU MSP430F2274, 16 bits et offrent une performance de 16-MIPS conçu pour des applications embarquées à basse consommation et à faible coût. Il est particulièrement adapté aux applications sans fil fonctionnant sur batteries, (figure3.2). [29]

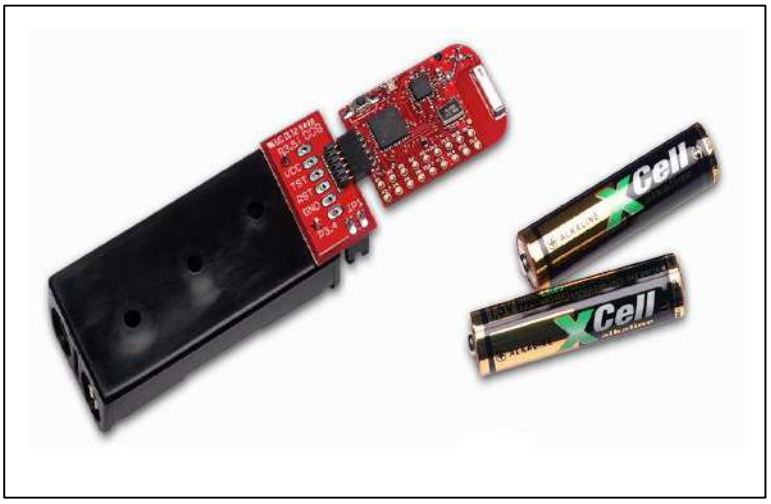


Figure 3.2. *Le capteur MSP 430-RF2500 et son support batterie.*

Le kit de développement sans fil eZ430-RF2500 est d'une taille d'une clé USB permet d'envoyer et de recevoir des données du PC vers l'application MSP430, est un outil de développement complet pour les microcontrôleurs MSP430 de Texas Instrument, il comprend un module de programmation et débogage avec port USB pour communiquer avec un ordinateur hôte nécessitant une installation de pilote de deux cartes de circuits imprimés contenant chacune un microcontrôleur MSP430F2274 et un transmetteur RF CC2500 à faible courant opérant dans la bande de fréquences libres ISM 2.4 GHz. Le module de programmation est alimenté à partir du port USB, ainsi que l'une des cartes cibles, et la deuxième carte cible est alimentée par batterie ou toute autre source à faible puissance (Figure 3.3). [29]

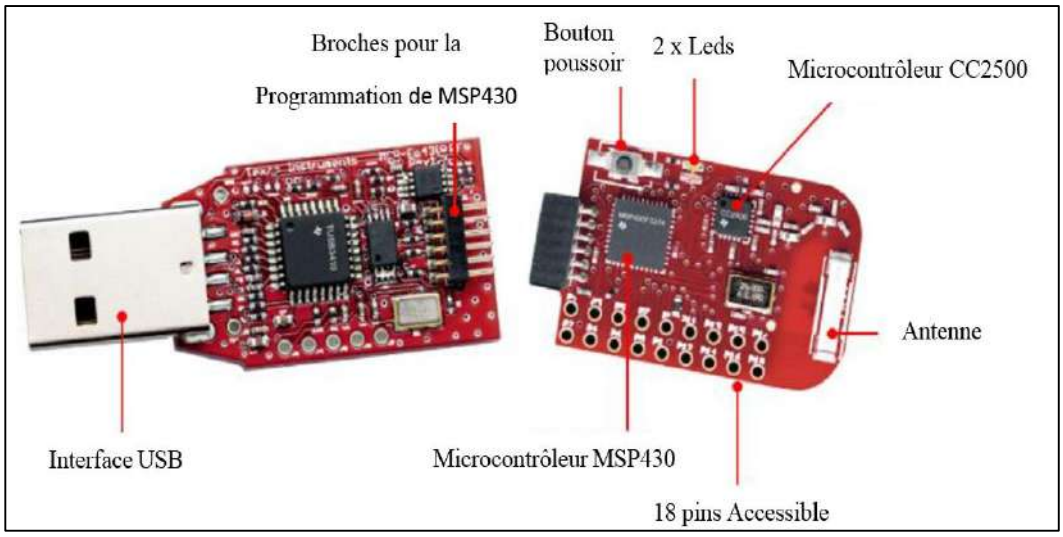


Figure 3.3. *Le kit de développement eZ430-RF2500.*

Les capteurs sont posés et attachés sur des pieds d'hauteur H=1.10mètre, pour éviter l'absorption des ondes radio via le sol, La figure 3.4 montre ce pied. [27]

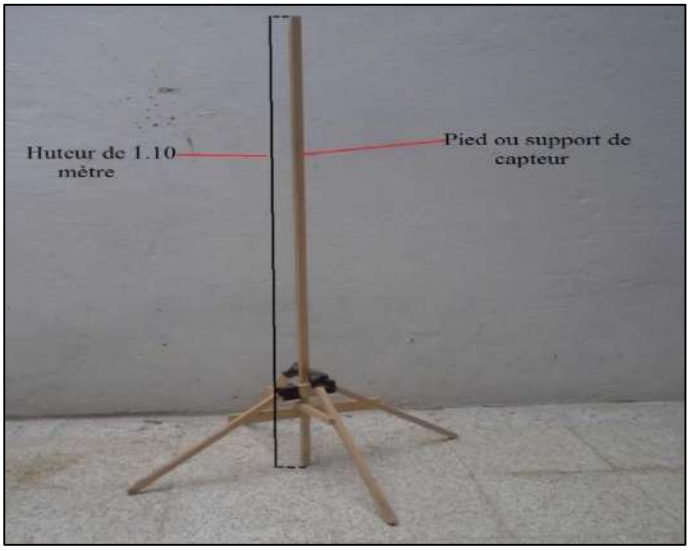


Figure 3.4. *Photo support du capteur.*

3.2. *Plate-forme logiciel*

Le kit sert à l'environnement de développement intégré IAR *Embedded Workbench Integrated Development Environment* (IDE) ou *Code Composer Studio* (CCS) qui s'exécutent sur l'ordinateur-hôte et communique avec le module de programmation pour écrire, télécharger, et debugger une application. Le débogage permet d'exécuter une application en pas à pas, ce qu'est très pratique en cas de problème.

Lors de ce projet nous avons utilisé l'environnement de développement intégré IAR offert par Texas Instrument dédié aux capteurs de cette même firme avec un squelette de programme IAR en langage C et différentes bibliothèques très utiles. **[29]**

Le document **[30]** montre les étapes et la méthode de création d'un projet sous l'environnement IAR.

Le projet SimplicitTI a été développé par Texas Instruments utilisant un ensemble des pilotes pour le Kit eZ430-RF2500 qui sont :

- ✓ **Mrfi :** (Minimal RF Interface), Contient des bibliothèques des différentes familles radio pour assurer les différentes applications concernant la partie radio.
- ✓ **Bsp :** (Board Support Package), Contient des fichiers drivers pour tous les composants de la carte.
- ✓ **Gradient :** Assure toutes les applications logiques des capteurs comme, l'initialisation de réseau, détection d'un nouveau capteur, la mise à jour, gestion du protocole de communication et le routage multi saut dans le réseau ainsi que plusieurs autres applications.

Les applications logicielles indispensables sont :

- ✓ **HyperTerminal :** Est utilisé pour lire les données via le port COM série crée par L'eZ430-CC2500 lorsqu'il est connecté au PC. Téléchargé du site [A].
- ✓ **Xming :** Est un portage sous Windows du système de fenêtrage X ouvert des systèmes Unix, Linux et permettre au scripte CYGWIN d'afficher des fenêtres. Il est fondé sur le serveur X.org. Il permet de rédiriger l'affichage sous Windows d'une application graphique tournant sur une machine distante, sous un autre système supporté par X.org. Téléchargé du site [B].
- ✓ **Cygwin :** Est Linux dans un environnement Windows, permet aux scriptes Linux d'être exécutés sur une machine Windows. Installé avec les packages (python, python-numpy, gcc-g++, gnuplot). Télécharger du site [C] et installer à partir du site [D].

L'**annexe A** montre les packages Cygwin à installer.

3.3. *Programmation des capteurs*

Les expériences ont été réalisées par des capteurs communiquant via des liens radio. Le programme nommé **txrx_wsn.c** [**Annexe B**], assure la communication entre les capteurs du réseau. Tous les 5 secondes, chaque capteur transmis à son voisin un message avec une puissance P sur le canal de transmission choisi. La station de base récupère tous les paquets venant à partir des capteurs du réseau. La figure suivante représente l'organigramme qui traduit l'algorithme général d'émission et de réception des paquets par un capteur à boucle infinie. [25]

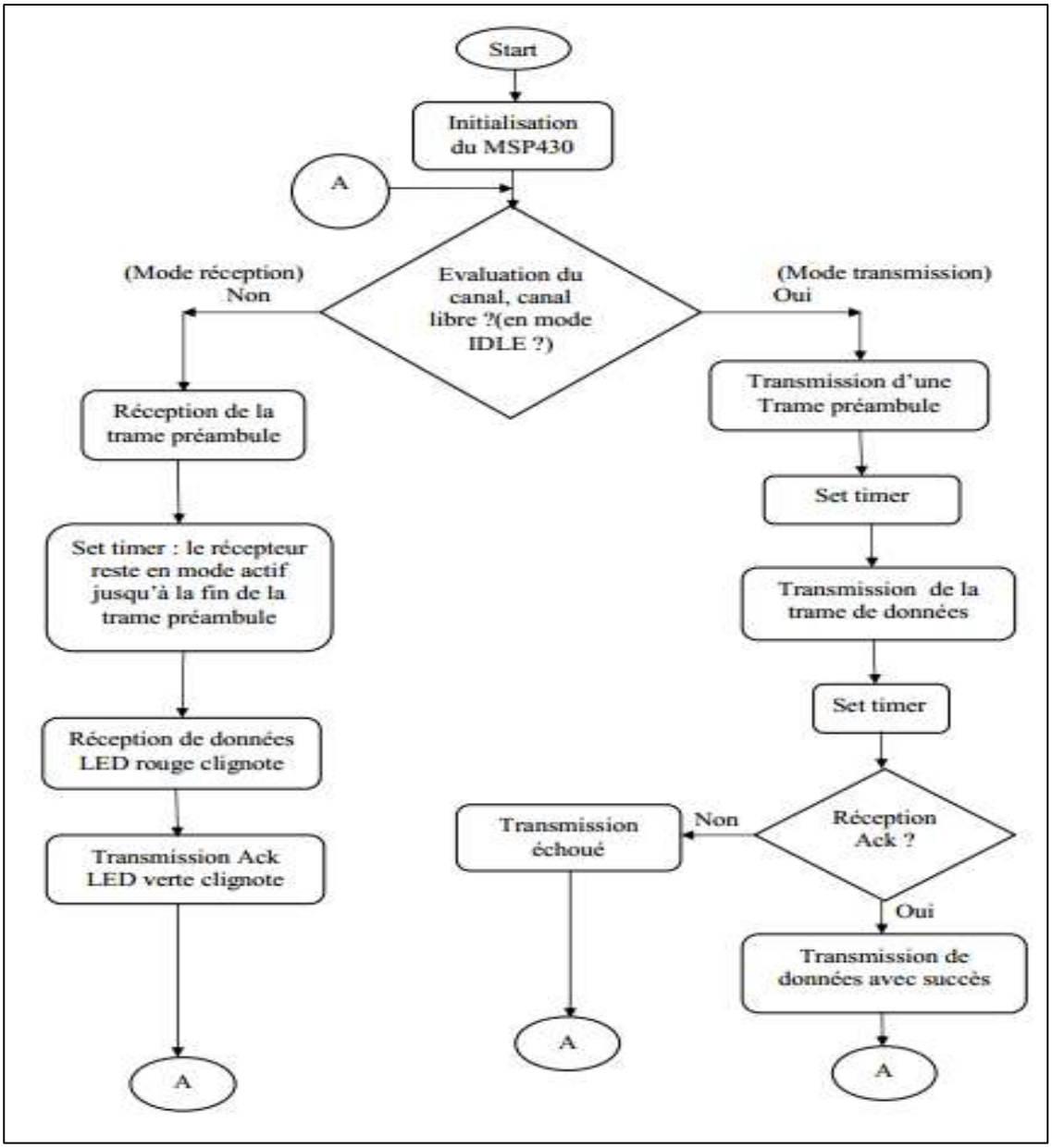


Figure 3.5. *Organigramme général d'émission et de réception des paquets de donnée par un capteur.* [25]

3.4. *Choix du canal de transmission*

Le programme nommé **txrx_noise.c** [**Annexe C**]**,** assure la représentation spectrale des fréquences des signaux et des bruits en temps réel, un autre programme nommé **txrx_noise.py** [**Annexe C**] développé en langage python permet de représenter l'interface graphique du spectre de fréquence des seize canaux.

Le programme nommé **txrx_simple.c** [**Annexe D**], assure la transmission continue d'un signal à partir d'un capteur vers l'analyseur de spectre branché au PC. Par la suite, le spectre de fréquence du signal reçu du capteur sera affiché sur l'interface graphique afin de faire le choix de fréquence ou du canal de transmission à utiliser.

La radio CC2500 permet de transmettre, quel que soit la fréquence appartient à la bande ISM avec une fréquence comprise entre 2400 Mhz et 2483.5Mhz. Les fréquences choisies sont séparées de 0.2Mhz par défaut, le choix de fréquence ce fait au niveau du registre **CHANNR** de la radio CC2500.

La figure 3.6 représente une décomposition du canal ISM. [31]

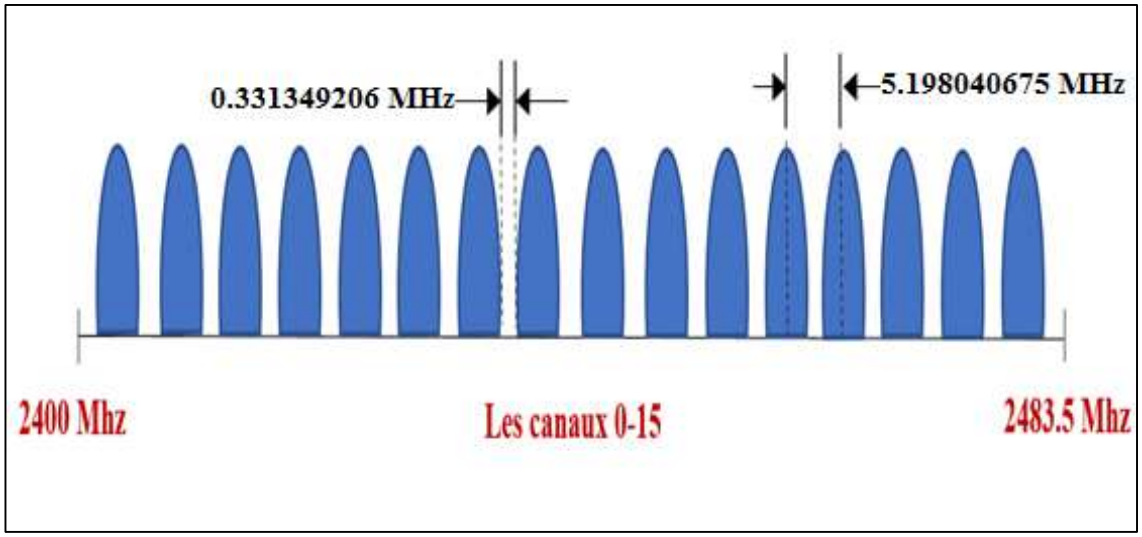


Figure 3.6. *Décomposition du canal ISM.* [31]

La formule représentée par l'équation *(EQ : 3.3)* est utilisée pour coder et choisir les fréquences pour le CC2500 :

$$\mathbf{f_{Utiliser} = f_{Base} + C_{Logique} \times C_{Esspacement}} \qquad \textbf{(EQ : 3.3)}[32]$$

Avec :

$f_{Utiliser}$: représente la fréquence utilisée.

f_{Base} : La fréquence de référence de la bande ISM (2400 Mhz).

$C_{Logique}$ **:** représente la valeur en décimale qui est dans le registre **CHANNR**.

$C_{Esspacement}$: L'espace fréquentiel entre deux bandes, cette fois c'est 0.331349206 Mhz.

On ajoute la commande « **#include "radios/family1/mrfi_spi.h"** » au sommet du programme de communication des capteurs, de cette façon nous avons accès à des fonctions de pilote de bas niveau qui nous permet d'écrire directement dans les registres de la radio CC2500, l'appelle de cette bibliothèque (*header*) est obligatoire. [33]

Le CC2500 appartient à la famille1 qui contient aussi le CC1100 et CC1101.On ajoute aussi la commande « **MRFI_Init();** » dans le programme, ensuite on introduit la valeur de la fréquence choisie dans le registre **CHANNR** de CC2500 en hexadécimale par la commande « **mrfiSpiWriteReg (CHANNR,0x**XX**)** ». Soyez conscient que les valeurs écrites dans le registre ne doivent pas dépasser la valeur **0xFC (252 en décimale),** cette valeur correspond à la fréquence 2483, 5 MHz endommagera la radio cc2500. Ces canaux sont déclarés dans un compteur au sommet de programme **txrx_noise.c et** avec leur espacement fréquentielle entre deux bandes. [33]

❖ **Exemple de choix de fréquence :**

Utilisant l'équation *(EQ : 3.3)* de codage, la fréquence utilisée est : 2450.00Mhz alors $C_{Logique}$ devient :

$$C_{logique} = \frac{f_{Utiliser} - f_{Base}}{C_{Esspacement}} = \frac{2450-2400}{0.331349206} \approx 150.90 \qquad (EQ : 3.4)$$

$C_{Logique}$ en décimale est 150.90, cette valeur doit être codé en hexadécimale qui devient 96 alors que la valeur écrite dans le registre **CHANNR** est : **0x97**.

Pour avoir une continuité de transmission dans le programme **txrx_simple.c**, on doit ajouter la commande suivante « **P1IFG |= 0x04;** ». [33]

Cette Commande permet de forcer l'interruption par le bouton.

Après l'installation de toutes les applications logicielles nécessaires sur le PC, l'un des deux capteurs est programmé comme analyseur de spectre par le programme **txrx_noise.c** qui sera branché au port USB, l'autre est programmé par **txrx_simple.c** est alimenté par une batterie, afin d'assurer une transmission continu pour confirmer les choix des fréquences. Le programme **txrx_noise.py** a été exécuté sous Cygwin permet de lire les informations récoltées du réseau via le port COM série et de les visualiser sur une interface graphique. La figure 3.7 montre la représentation spectrale

des fréquences dans l'analyseur de spectre. La figure 3.8 représente l'environnement de travail Cygwin. À travers cette méthode de codage utilisant l'équation (EQ : 3.3), on peut coder toute la bande ISM (2400 Mhz à 2483.5 Mhz).

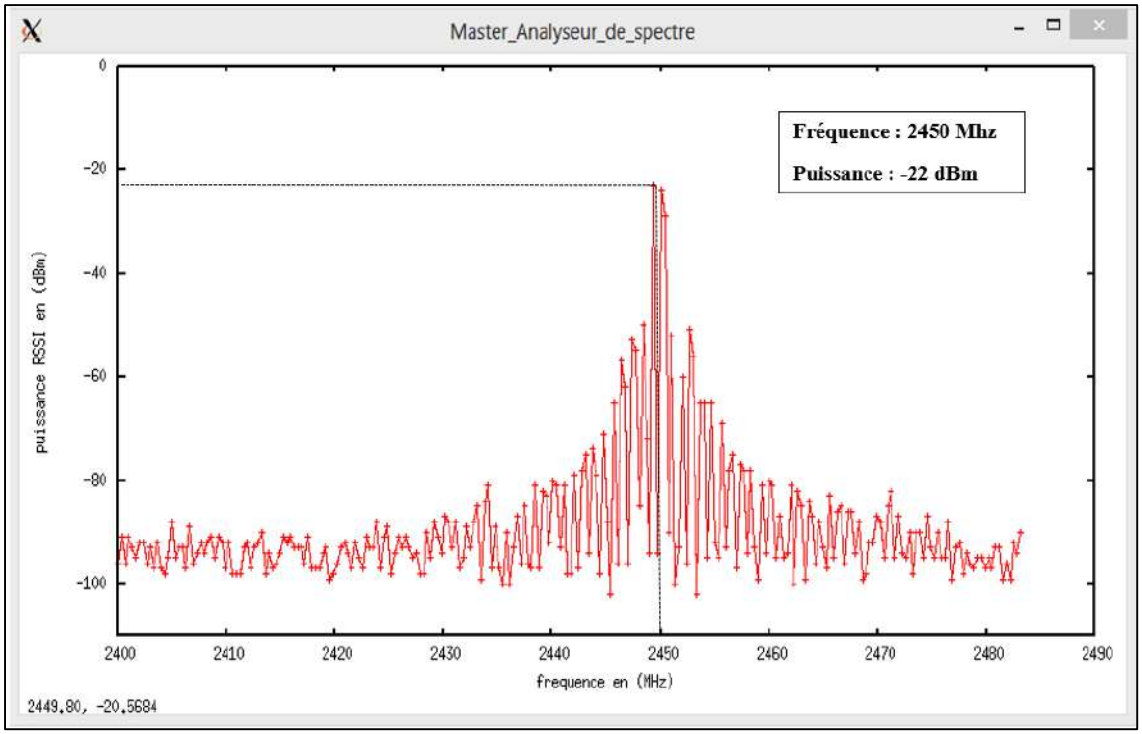


Figure 3.7. *Analyseur de spectre virtuel.*

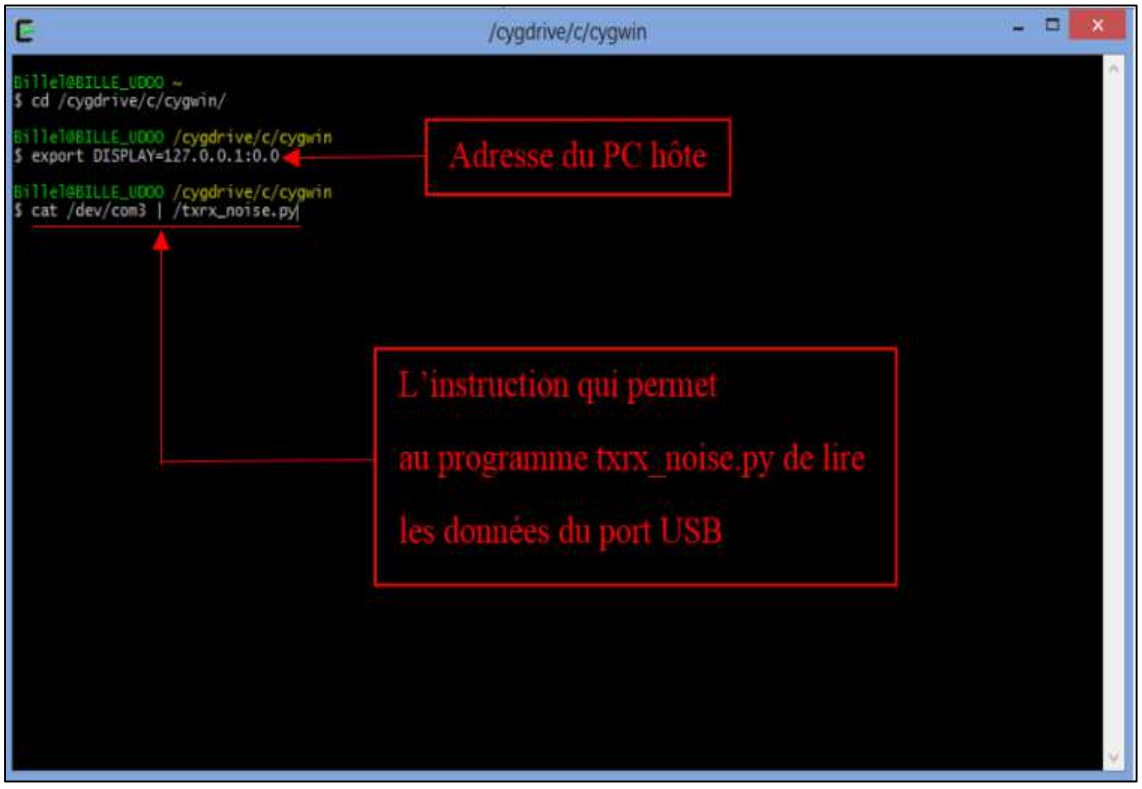


Figure 3.8. *Capture d'écran de l'environnement Cygwin.*

Le tableau suivant montre le codage typique de la bande ISM :

Tableau 3.1. *Le codage typique de la bande ISM.*

N° de canal	Fréquence utilisé	$C_{Logique}$ en décimale	$C_{Logique}$ en hexadécimale
0	2402.764695	8	0x08
1	2407.962736	24	0x18
2	2413.160777	39	0x27
3	2418.358818	55	0x37
4	2423.556859	71	0x47
5	2428.754900	86	0x56
6	2433.952941	102	0x66
7	2439.150982	118	0x76
8	2444.349023	134	0x86
9	2449.547064	149	0x95
10	2454.745105	165	0xA5
11	2459.493146	180	0xB4
12	2465.141187	196	0xC4
13	2470.335928	212	0xD4
14	2475.535269	228	0xE4
15	2480.73531	244	0xF4

3.5. Choix de la puissance d'émission

La puissance d'émission et de réception d'un signal peut être également exploiter pour obtenir la distance entre deux capteurs. La technique RSSI considère la perte de puissance d'un signal entre son émission et sa réception, cette perte varie en fonction de la distance entre les deux capteurs : plus les capteurs sont éloignés, plus la perte est importante, cette perte sera alors traduite en une distance.

Le CC2500 contient un registre **PATABLE**, permet de choisir la puissance d'émission du signal à partir d'un capteur.

L'intervalle des valeurs de puissance écrites dans le registre PATABLE sont comprises entre 0x00 et 0xFF en hexadécimale, la commande « **mrfiSpiWriteReg (PATABLE,0x**XX**)**» [33] permet d'introduire et d'écrire la puissance d'émission qu'on doit l'ajouter juste après la commande de choix de fréquence avant d'appeler la bibliothèque radio de CC2500. La puissance d'émission par défaut est -16dBm c'est à-dire : sans écrire la valeur de la puissance dans le registre **PATABLE**. Le tableau suivant montre quelque valeur de puissance d'émission.

Tableau 3.2. *Variation typique de la puissance d'émission.* **[33]**

Registre PATABLE	La puissance en (dBm)	La puissance en (milliwatts)
0xFF	1	1.2589
0x97	-10	0.1
0x46	-20	0.01
0x50	-30	0.001

3.6. Environnement et scénarios des expériences

Les expériences ont été faites pendant la journée du 24/04/2014, et ont été réalisés dans un environnement dégagé sur un terrain plat et calme dans le centre du terrain de football du stade IMAME LYES de la commune de Médéa et sous les conditions atmosphériques suivantes :

La Température : 14C° à 21 C°, le vent : vitesse faible dans toutes les directions (10 Km/h).

Dans nos expérimentations, il n'y a en revanche presque aucune dynamique. On fixe un capteur et on déplace le deuxième par un pas de 0.5 mètre jusqu'à une distance de 5 mètres. Cette distance est fixée pour toutes les expériences et elle est limitée par l'atténuation du RSSI. Pour chaque position du capteur, on mesure la valeur du RSSI sous des conditions dégagés.

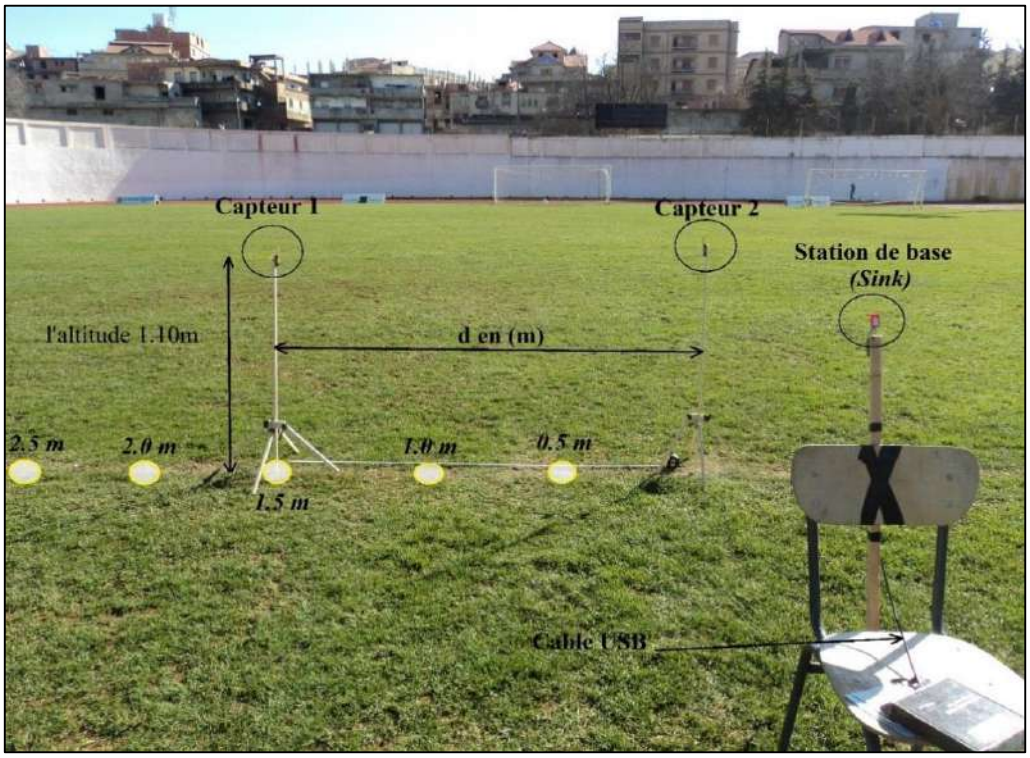


Figure 3.9. *Photo de l'Environnement des expériences.*

3.7. Technique de récupération de RSSI

Les capteurs peuvent communiquer entre eux par liens radio, la valeur de RSSI peut être notifier par le registre métrique de la radio de chaque capteur et transmis à la station de base qui récupère tous les RSSIs des capteurs du réseau et de les transmettre à son tour au pc.

Les données échangées à travers un lien radio sont sous forme de paquets, contenant en plus un message à transmettre un nombre d'informations concernant l'émetteur, le destinataire et le contenu du message.

Dans notre étude, on s'intéresse à la couche physique et sur le premier octet de la donnée radio c'est le RSSI, qui est dans un registre du hardware de la radio. La valeur du RSSI est toujours moyennée sur 8 périodes de temps (~128µs). Elle contient deux couches physique et MAC.

La puissance du signal radio peut être calculer par la formule de calibration suivante :

$$p = RSSI_{value} + RSSI_{off\ set} \qquad (EQ : 3.4)[33]$$

Où l'offset est une correction trouvée empiriquement lors de la conception du hardware. Avec une approximation de : -45dBm. [33]

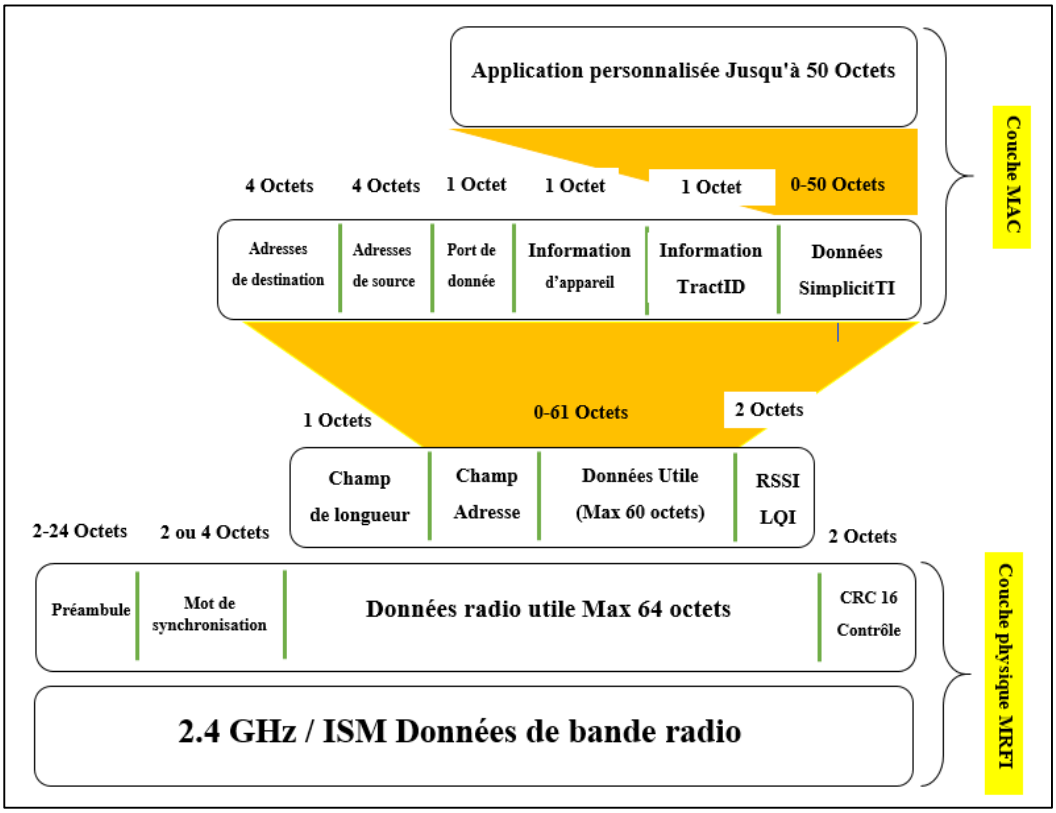


Figure 3.10. *Trame de paquet échangé pour le CC 2500.* [34]

L'exécution du programme **txrx_wsn.py** [**Annexe B**] affiche les deux fenêtres représentées par les deux figures 3.11 et 3.12.

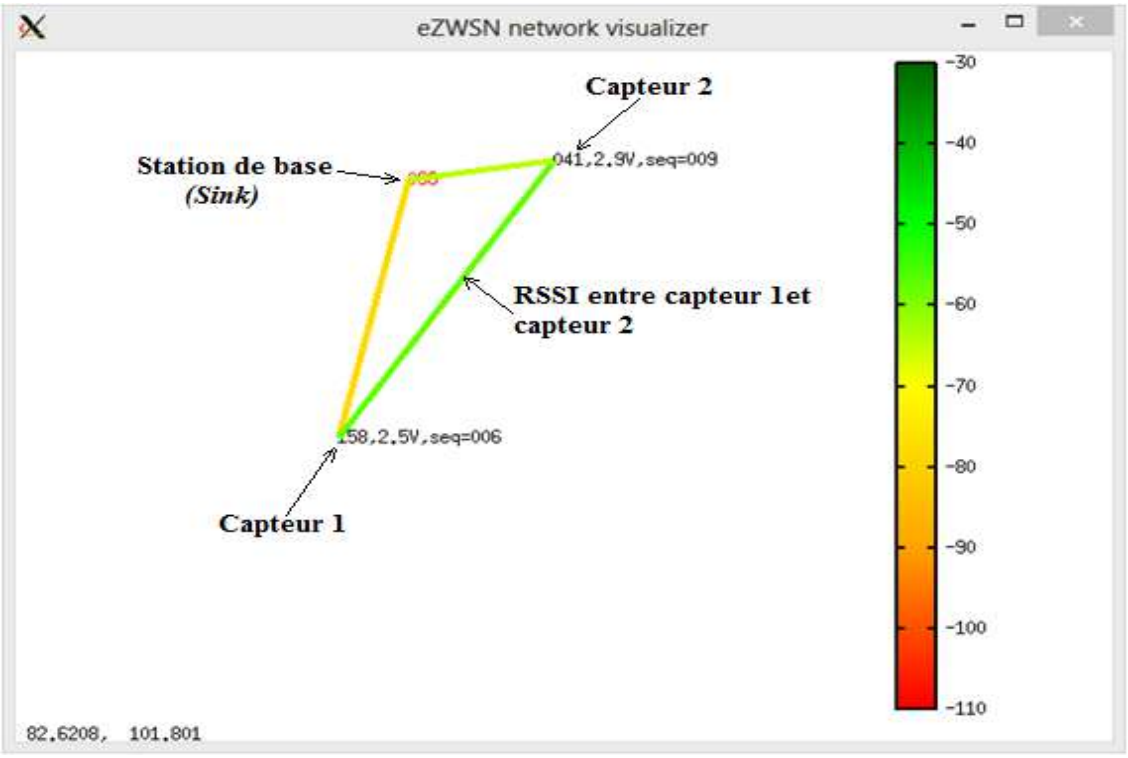


Figure 3.11. *Capture d'écran de la carte virtuelle relative au réseau WSN.*

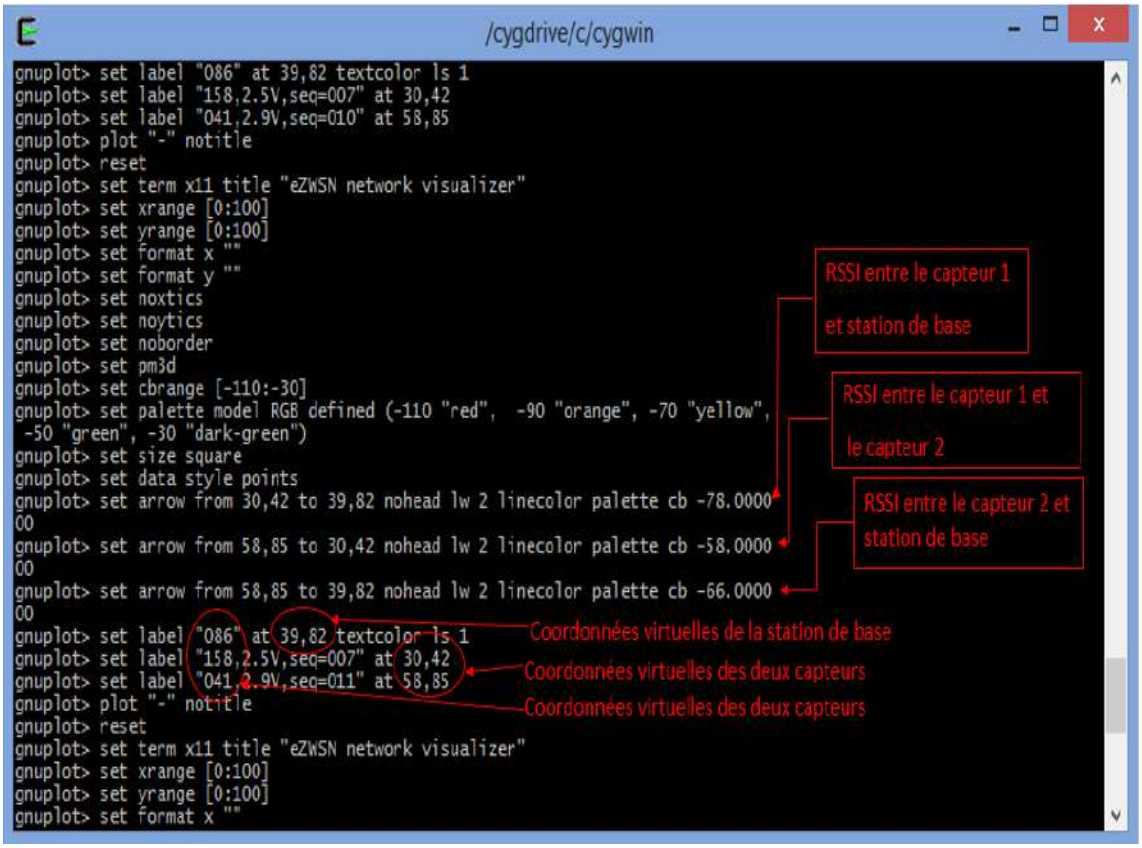


Figure 3.12. *Capture d'écran de l'environnement Cygwin.*

La première fenêtre de la figure 3.11 représente la carte relative du réseau WSN, l'autre fenêtre figure 3.12 représente l'environnement CYGWIN où nous avons récupéré les valeurs du RSSI.

3.8 Scénarios des expériences

Pendant toutes les expériences, les deux capteurs restent en vue directe sans aucun obstacle, aucun mouvement dynamique autour, à une hauteur de 1.10 m, dans un milieu dégagé. **[27]**

Pour chaque expérience, on fixe la puissance d'émission et on fait varier le canal de transmission.

Les puissances d'émission utilisées sont :(1dBm, -10dBm, -20dBm, -30dBm) et les canaux de transmission utilisés pour chaque puissance sont : (0, 4, 8, 12, 15). Ce choix des puissances et des fréquences est basé sur des études qui montrent que si les fréquences et les puissances d'émission sont proches, on ne peut pas remarquer leurs influences sur la mesure du RSSI. **[31]**

Les résultats des expériences sont ou est les courbes qui montrent l'évolution du RSSI en fonction de la distance et seront comparées par rapport à la courbe de l'équation du bilan de liaison *(EQ : 3.2),* qui montre l'atténuation du signal entre un capteur MSP 430 émetteur et un capteur MSP 430 récepteur dans le cas où on considère que le RSSI est un métrique d'estimation des distances.

Par la suite, on estime toutes les distances en fonction des RSSIs mesurées pour chaque puissance d'émission et pour tous les canaux de transmission choisis à l'aide de la fonction inverse du bilan de liaison **:**

$$\boldsymbol{d(m) = 10^{\frac{-65-RSSI}{20}}(m)} \qquad \textbf{(EQ : 3.5)} \text{ [25]}$$

Et on présente les courbes qui montrent les distances réelles et les distances estimées. Ces derniers nous permettent de déduire l'écart entre la distance estimée et la distance réelle pour calculer l'erreur RMSE d'estimation de distance. La puissance d'émission et le canal de transmission fiable à utiliser dans le domaine de localisation dans les réseaux de capteurs sans fil sont celles qui donnent une faible erreur RMSE. *(EQ : 2.8)*

4. Résultats et analyses

Dans cette partie, on présente tous les résultats obtenus par chaque expérience avec une analyse de chacune d'elle.

4.1. Première expérience

Pendant la première expérience, la puissance d'émission est fixée à 1dBm et les canaux de transmission utilisés sont celles cités au paragraphe 3.8.

La figure 3.13 montre les resultats de l'evolution du RSSI mesuré en fonction de la distance entre les deux capteurs comparés avec le modele théorique.

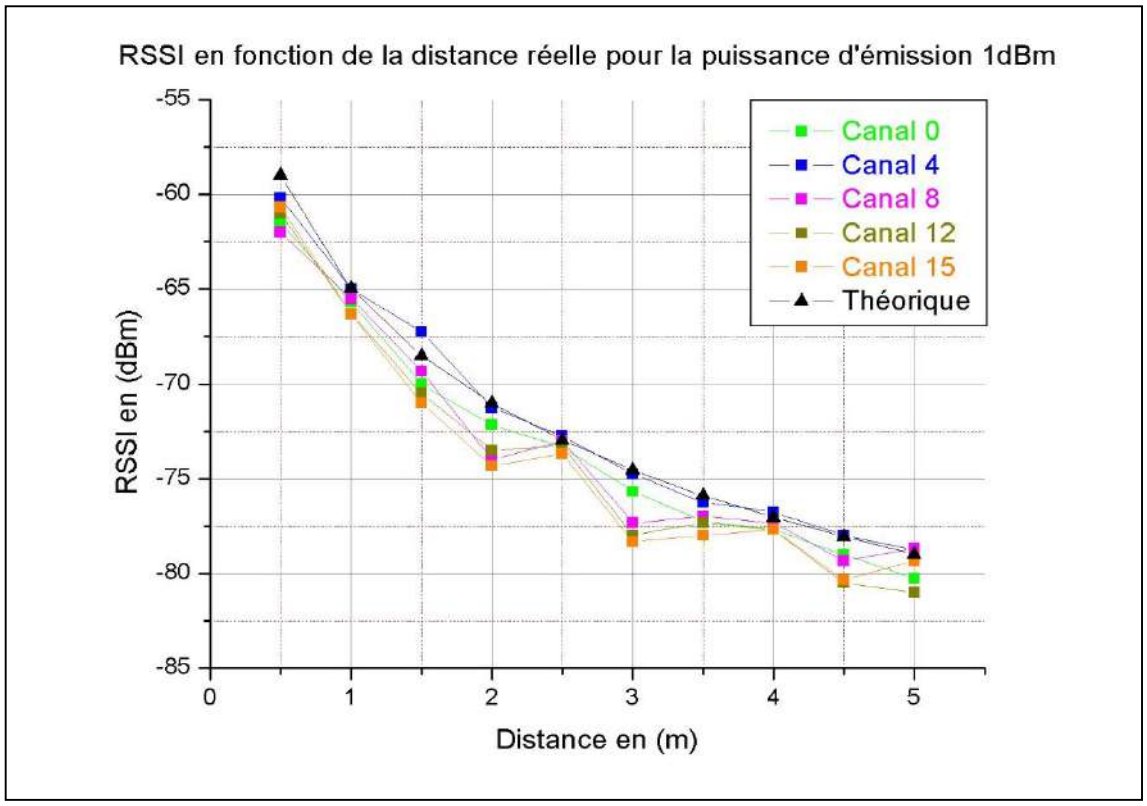
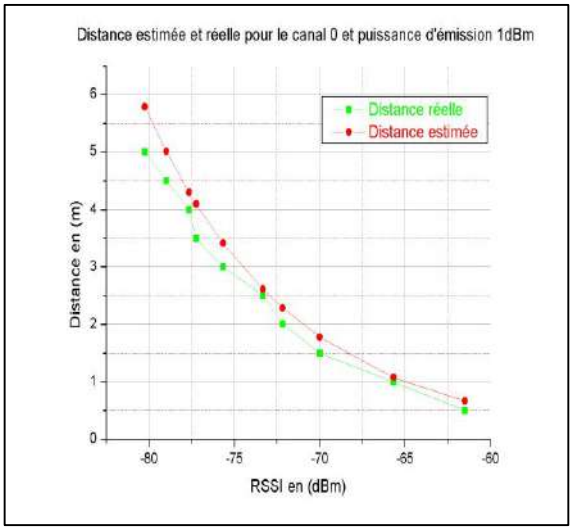


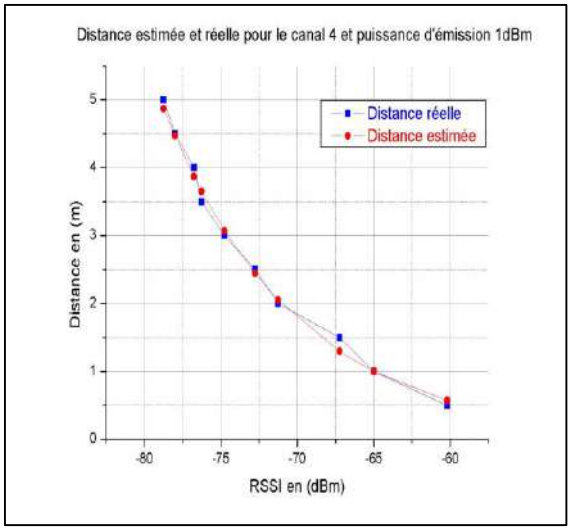
Figure 3.13. *RSSI en fonction de la distance réelle pour les cinq canaux à 1dBm.*

Ces courbes montrent clairement que pour le canal 4 l'évolution de RSSI suit une allure logarithmique celle du modèle mathématique du bilan de liaison *(EQ : 3.2)* durant tout le trajet de0.5m à 5m, même pour le canal 0. On remarque qu'il suit une allure logarithmique, mais un peu atténuer, par contre pour les autres canaux à partir du deuxième mètre, il ya faible instabilité.

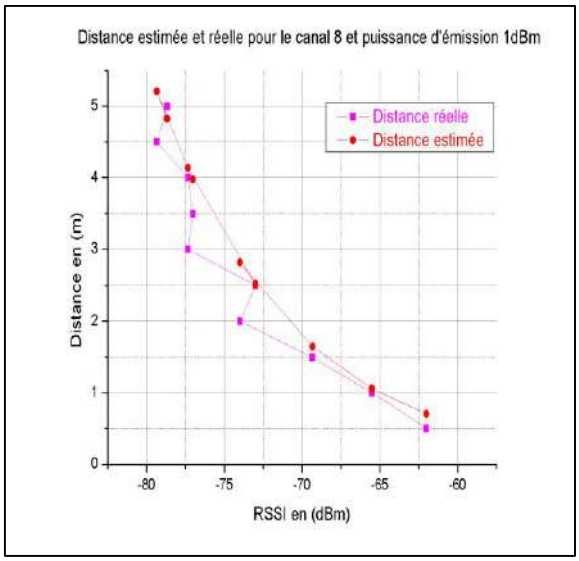
Pour une meilleure analyse et interprétation des résultats obtenus, on estime les distances entre les deux capteurs en fonction des valeurs RSSIs mesuré à l'aide de la fonction inverse du bilan de liaison entre un émetteur et un récepteur d=f(RSSI) *(EQ : 3.5)*. On les compare avec les distances réelles.Les courbes de la figure 3.14 montrent les distances estimées et réelles en fonction de la puissance reçue RSSI mesurée, suivie par des courbes qui donnent les écarts entre les distances estimées et les distances réelles.



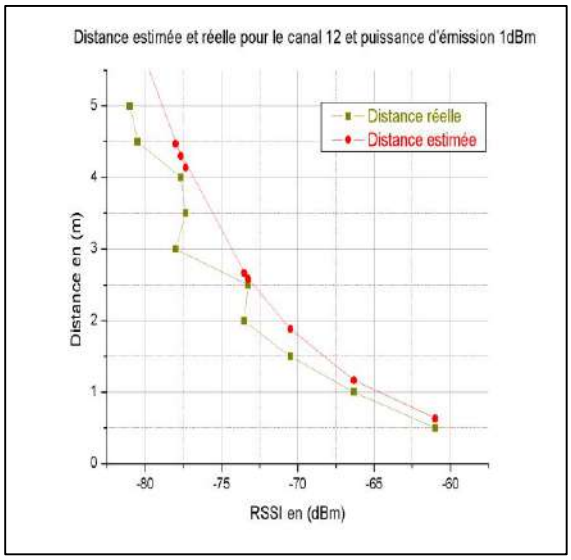
Courbe1 : *Canal 0.*



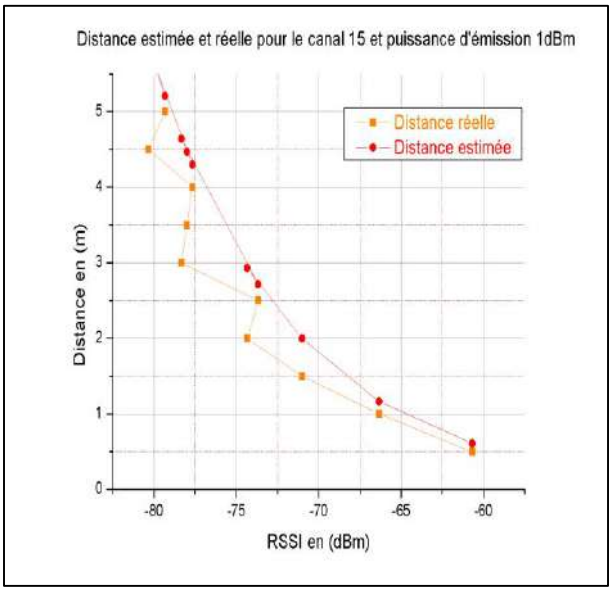
Courbe2 : *Canal 4.*



Courbe3 : *Canal 8.*

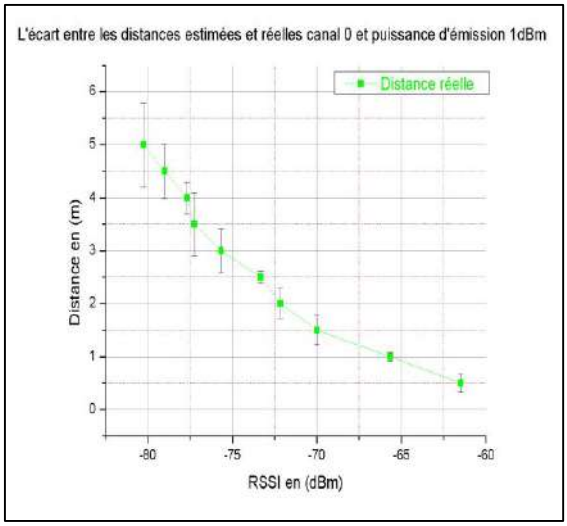


Courbe4 : *Canal 12.*

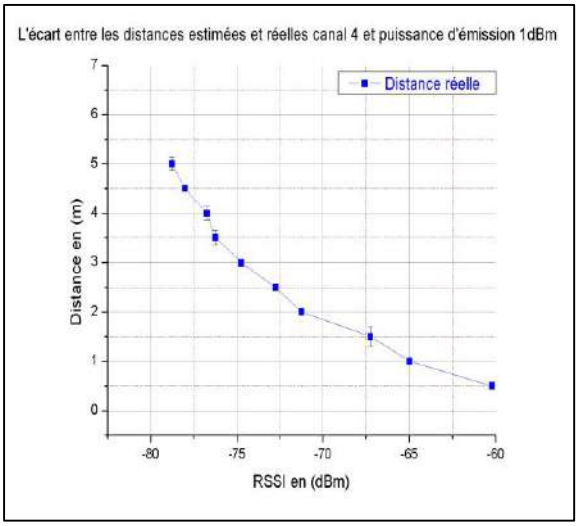


Courbe5 : *Canal 15.*

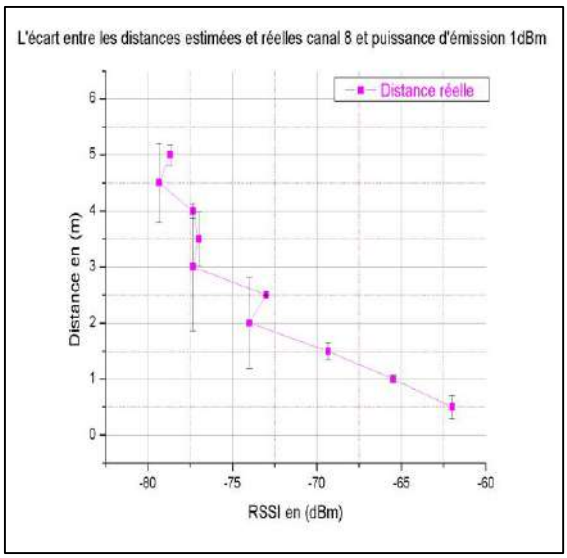
Figure 3.14. *Distances réelles et estimées pour les cinq canaux à 1dBm.*



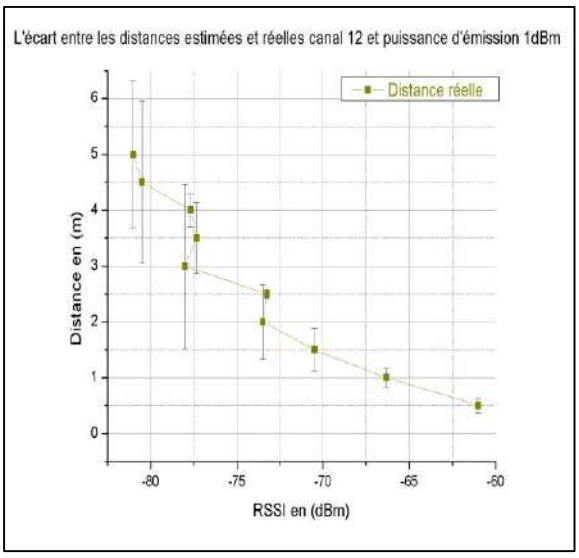
Courbe1 : *Canal 0.*



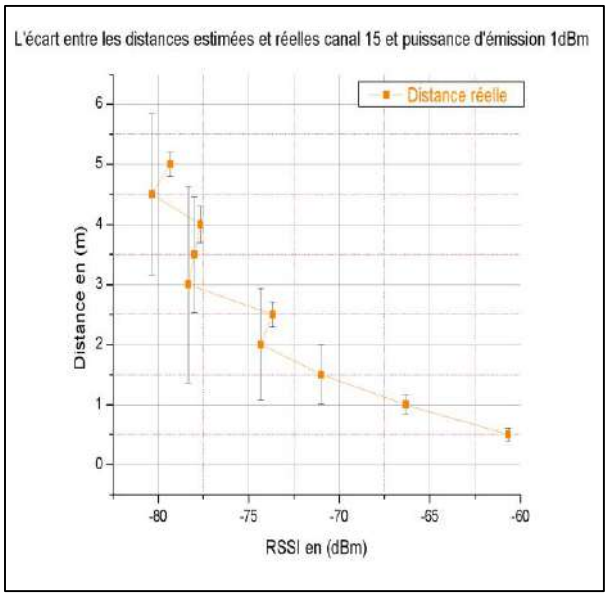
Courbe2 : *Canal 4.*



Courbe3 : *Canal 8.*



Courbe4 : *Canal 12.*



Courbe5 : *Canal 15.*

Figure 3.15. *L'écart entre les distances réelles et estimées pour les cinq canaux a 1dBm.*

Les courbes de la figure 3.14 montrent que le canal 4 donne une allure de la distance estimée est presque exactement la même que celle de la distance réelle et suit une allure de l'équation *(EQ : 3.5)*.

Pour le canal 0, la courbe de la distance estimée suit une allure exponentielle, mais un peu amplifié par rapport à celle de la distance réelle. Alors que, pour les autres canaux, il y a une instabilité remarquable au-delà du premier mètre.

La figure 3.15 montre les écarts entre les distances réelles et celles estimées où on constate très bien que pour le canal 4, il y a un très faible écart pour le point de distance d=5 mètres. Alors que, pour les distances inférieures à 4.5 mètres, il n'ya en revanche aucun écart. Pour le canal 0 il y a un faible écart au-delà de la distance d= 3.5 mètres et pour les autres canaux l'écart devient important à partir du deuxième mètre.

A' l'aide de ces courbes, on calcule l'erreur RMSE sur l'estimation de la distance pour chaque canal, afin de déterminer le canal optimal qui correspond à l'erreur minimale pour une puissance de transmission de 1dBm. Le tableau 3.2 montre l'erreur RMSE sur l'estimation des distances pour chaque canal de transmission et montre que l'erreur RMSE d'estimation des distances est minimale en utilisant le canal 4.

Tableau 3.3 : *les valeurs d'erreurs RMSE pour les canaux utilisés à 1dBm.*

Les canaux	Canal 0	Canal 4	Canal 8	Canal 12	Canal 15
RMSE (m)	0.13	0.11	0.53	0.84	0.82

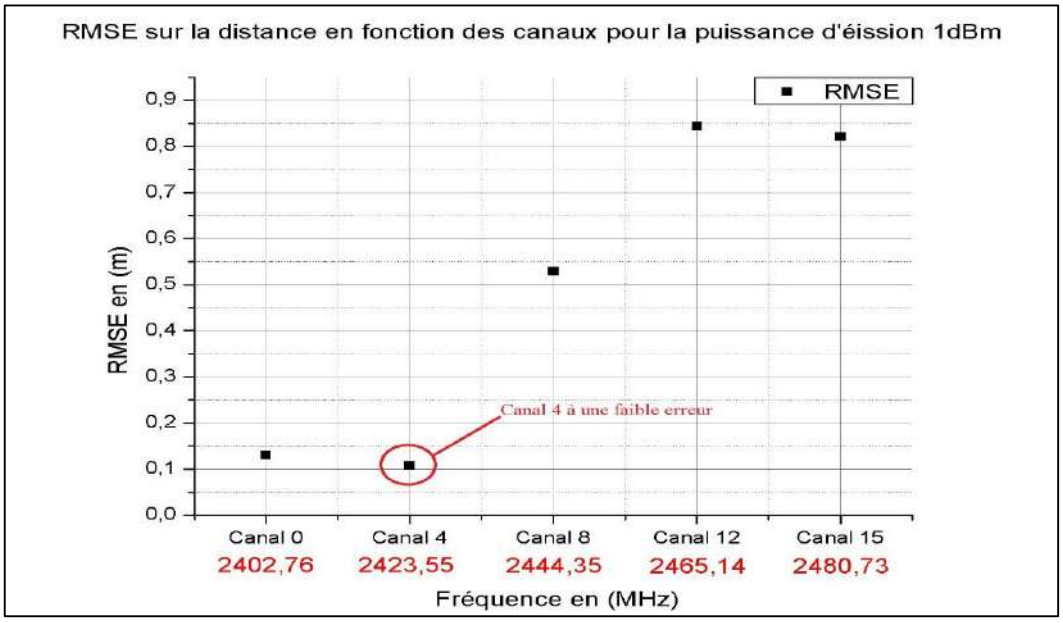


Figure 3.16. *L'évolution de l'erreur RMSE en fonction canal de transmission à 1dBm.*

Conclusion 1

Le canal 4 donne une faible erreur d'estimation des distances pour une puissance de transmission de 1dBm.

4.2. Deuxième expérience

On répète le même scénario que pour la première expérience avec une puissance de d'émission de -10 dBm et les même canaux de fréquence de transmission.

La figure 3.17 montre l'évolution des RSSIs mesurés en foction de la distance réelle.

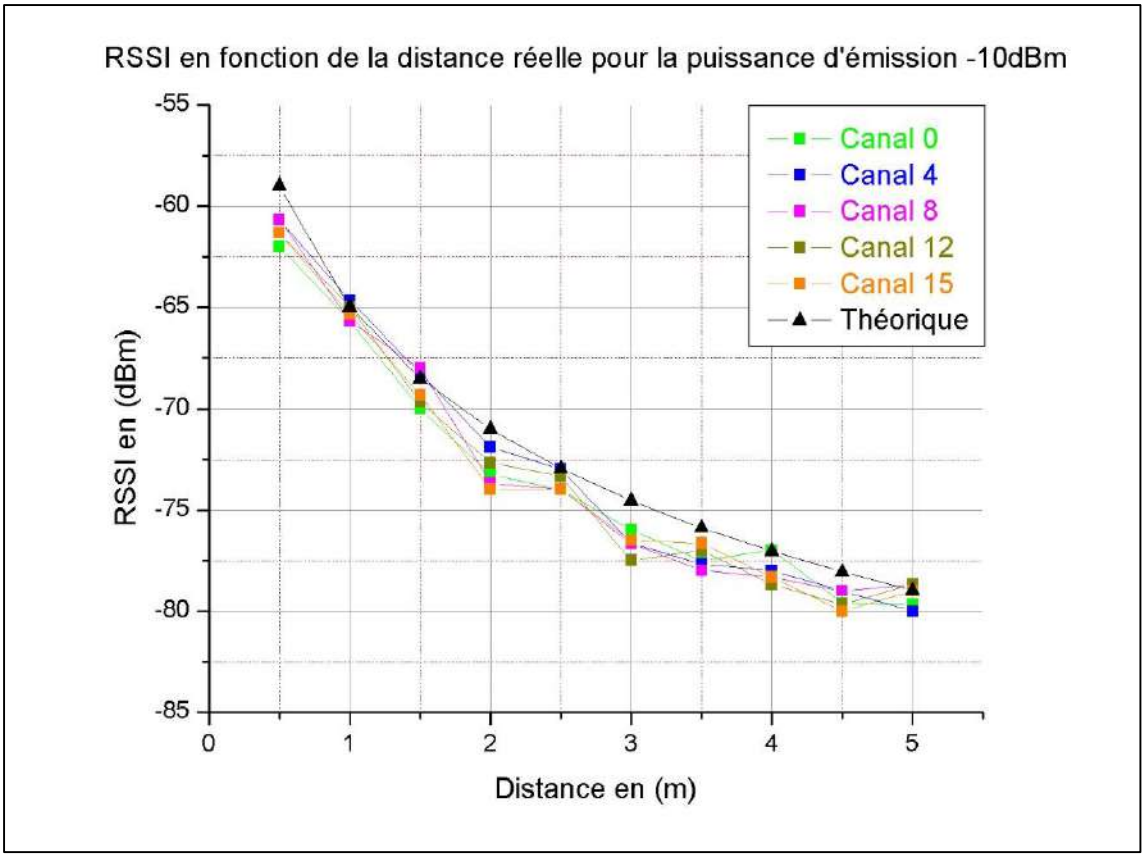
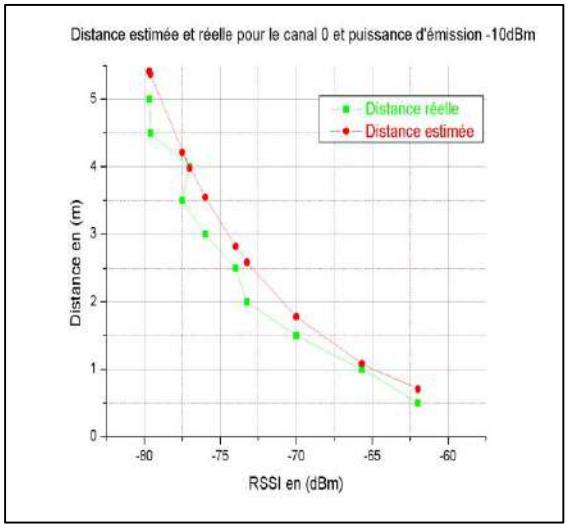
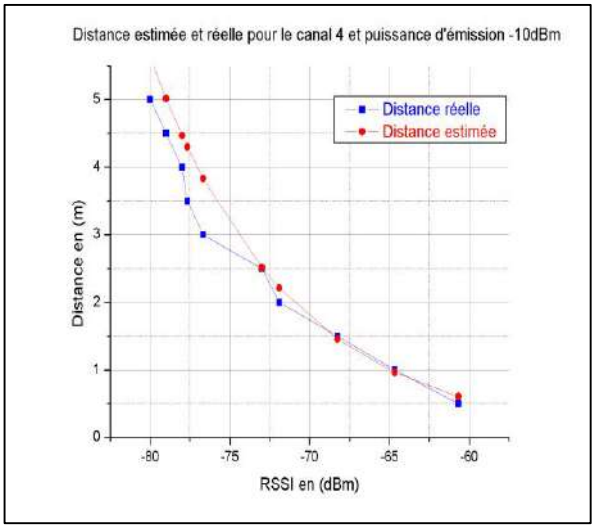


Figure 3.17. *RSSI en fonction de la distance réelle pour les cinq canaux à -10dBm.*

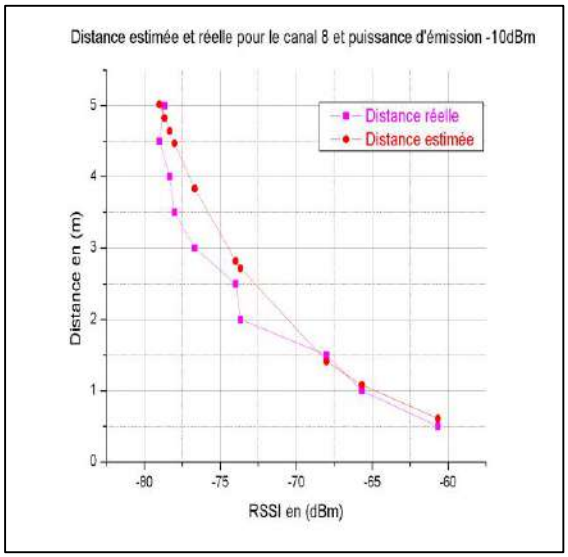
Cette figure montre que les cinq courbes sont regroupées sous une même enveloppe qui suit une trajectoire logarithmique. À partir des courbes de la figure 3.18 qui représentent pour chaque canal de transmission, la distance réelle et celle estimée, on déduit les écarts des distances qui sont représentées par la figure 3.19, et on calcule l'erreur RMSE sur l'estimation des distances pour chaque canal de transmission. Les résultats sont relevés sur le tableau 3.4 et la figure 3.20 qui montre l'évolution de l'erreur RMSE en fonction du canal de transmission à une puissance d'émission de -10 dBm.



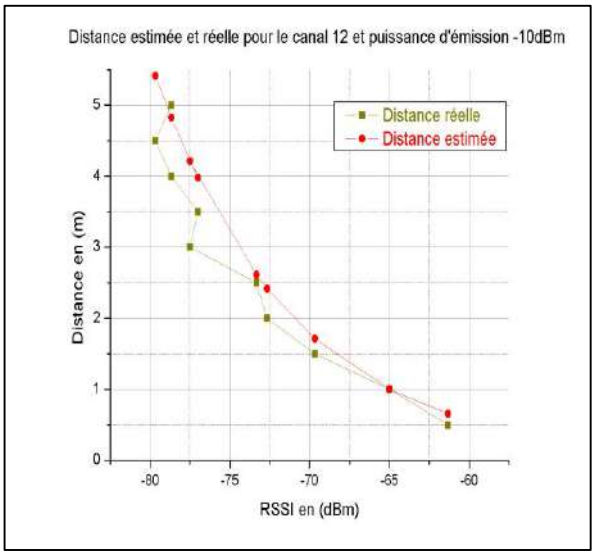
Courbe1 : *Canal 0.*



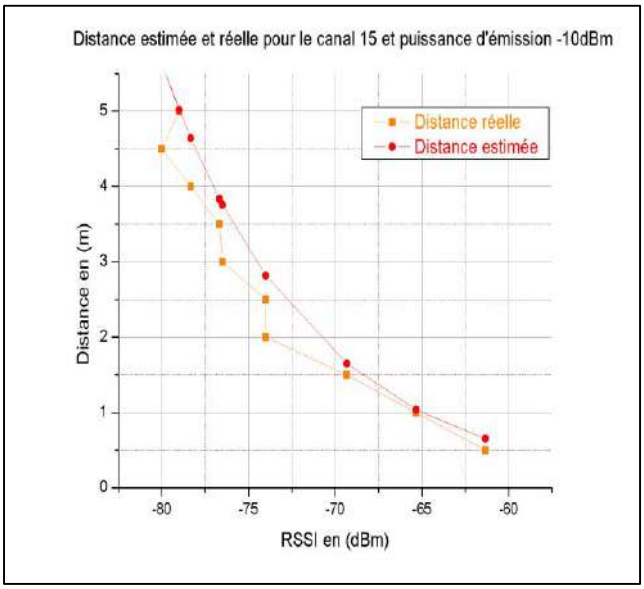
Courbe2 : *Canal 4.*



Courbe3 : *Canal 8.*

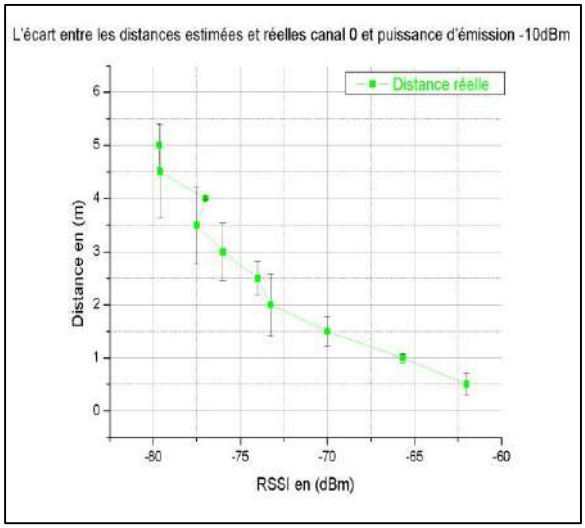


Courbe4 : *Canal 12.*

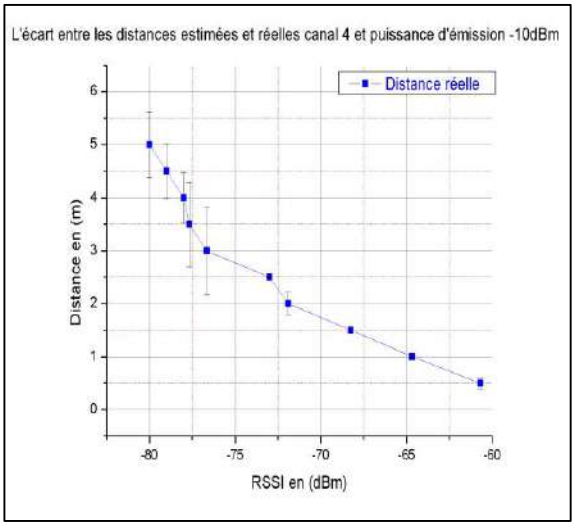


Courbe5 : *Canal 15.*

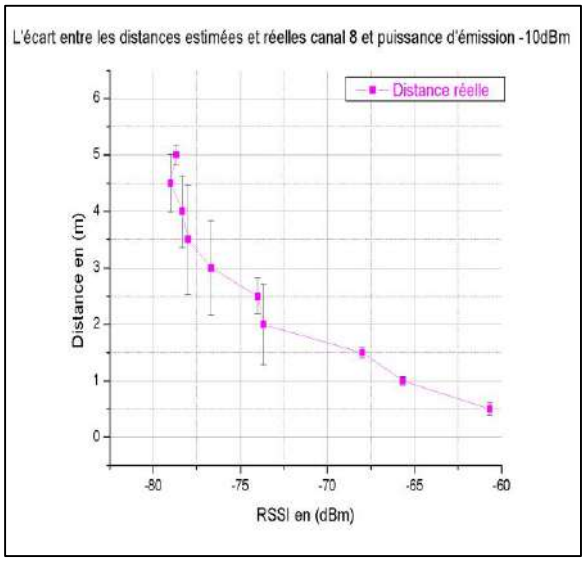
Figure 3.18. *Distances réelles et estimées pour les cinq canaux à -10dBm.*



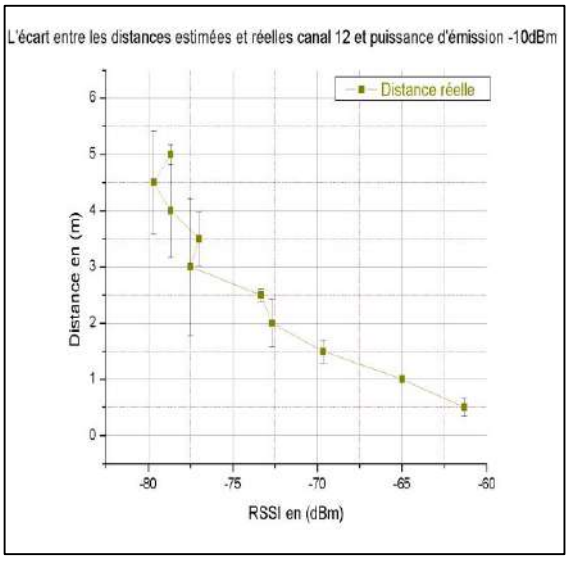
Courbe1 : *Canal 0.*



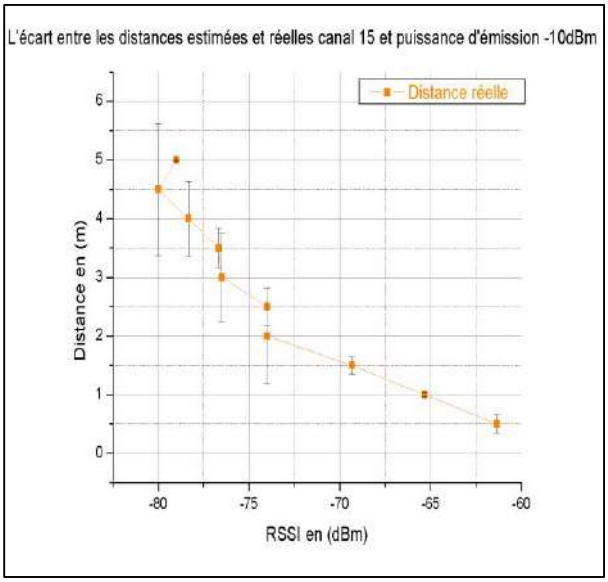
Courbe2 : *Canal 4.*



Courbe3 : *Canal 8.*



Courbe4 : *Canal 12.*



Courbe5 : *Canal 15.*

Figure 3.19. *L'écart entre les distances réelles et estimées pour les cinq canaux a -10dBm.*

Les résultats obtenus lors de cette expérience diffèrent de la première. La figure 3.18 montre que pour le canal 4 a une puissance d'émission de -10dBm la courbe de distance réelle a une forme exponentielle arrivant au 2.5 mètres et devient aléatoire à partir de cette distance jusqu'à 5 mètres, pour les autres canaux, on remarque que les courbes de distance réelle ont une forme exponentielles du 0 mètre à 1.5mètre et sont aléatoires au-delà de 1.5 mètre.

La figure 3.19 montre que pour le canal 4 les écarts sont presque nuls pour les distances inférieures à 2.5mètres et sont importants à partir de cette distance, alors que, pour les autres canaux l'écart est très important, à partir du premier mètre.

Seul le calcul de RMSE sur l'estimation des distances qui peut nous indique sur le bon canal de transmission à être utilisé dans ces conditions.

Tableau 3.4. *Les valeurs d'erreurs RMSE pour les canaux utilisé à -10dBm.*

Les canaux	Canal 0	Canal 4	Canal 8	Canal 12	Canal 15
RMSE (m)	0.48	0.48	0.54	0.59	0.56

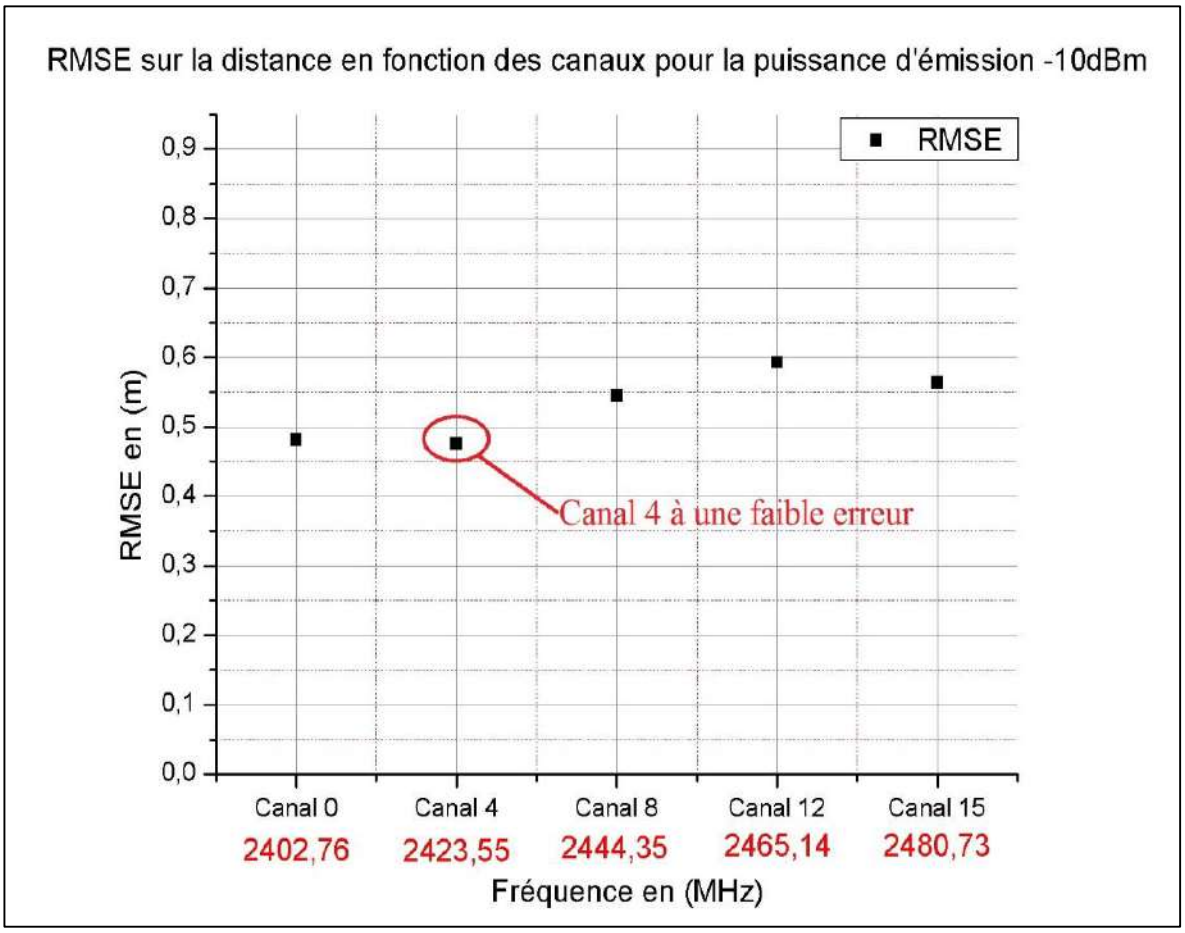


Figure 3.20. *L'évolution de l'erreur RMSE en fonction canal de transmission à -10dBm.*

Le tableau 3.4 et la figure 3.20, montrent l'évolution des RMSEs en fonction des canaux de transmission et nous indique clairement que l'erreur est minimale pour le canal 4.

Conclusion 2

Le canal 4 reste toujours le meilleur canal de transmission, même avec une puissance de transmission de -10 dBm, mais cette fois ci, l'erreur RMSE d'estimation des distances est supérieure à ce qui utilise la puissance de 1 dBm.

4.3. Troisième expérience

La puissance d'émission utilisée dans cette expérience est de -20dBm. La figure 3.21 résume les résultats obtenue pour les RSSIs mesurés en fonction de la distance réelle.

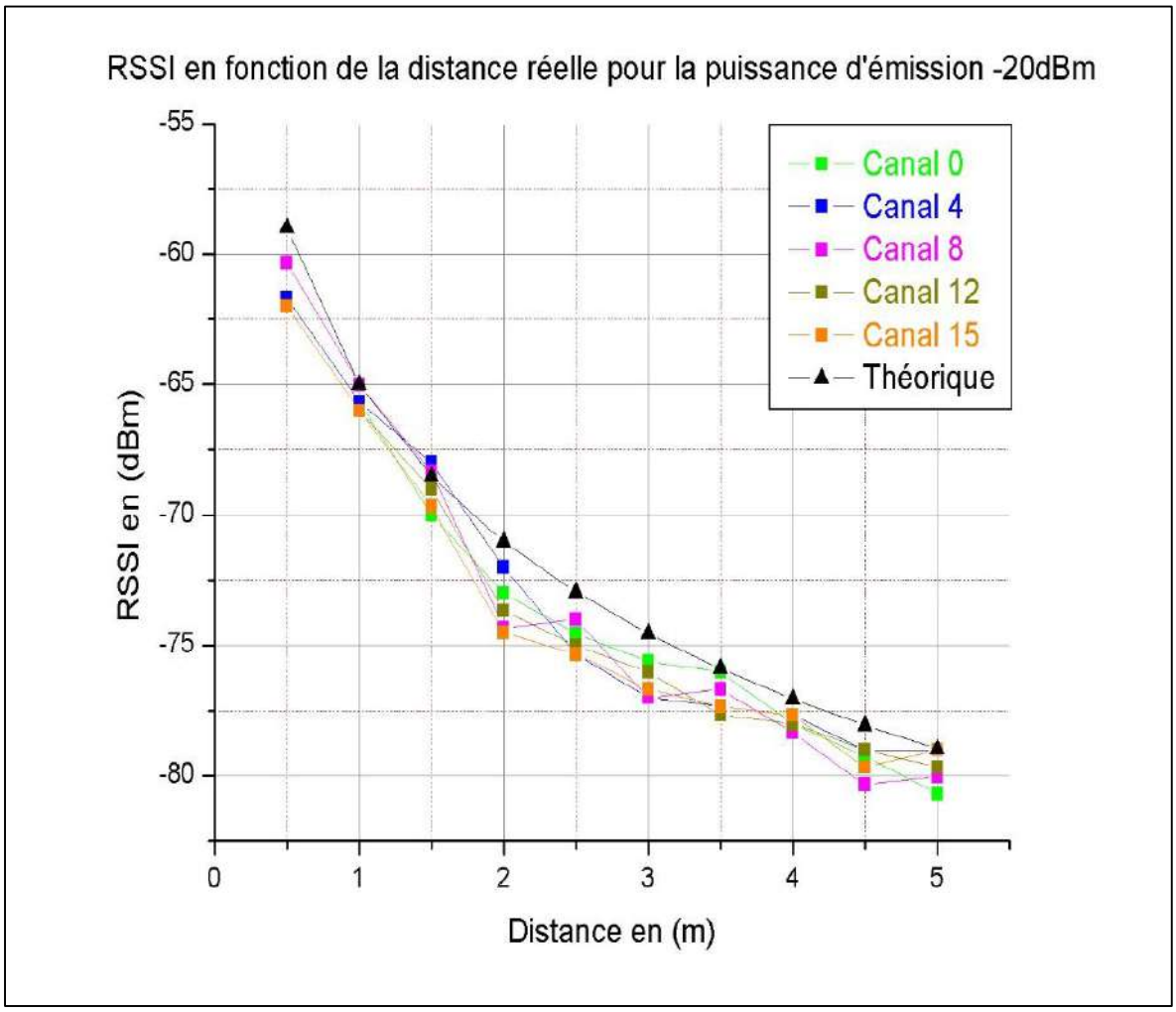
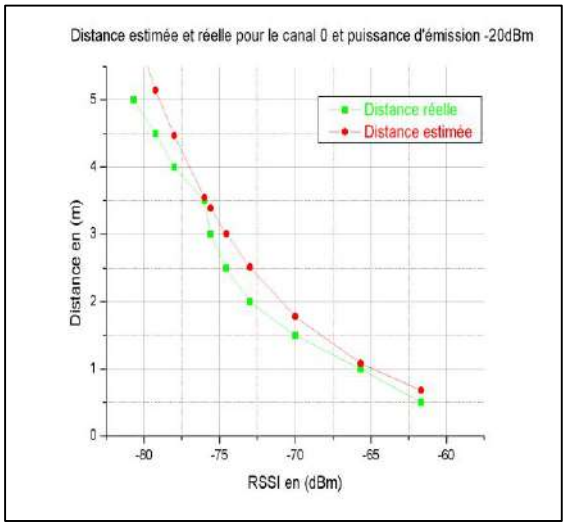
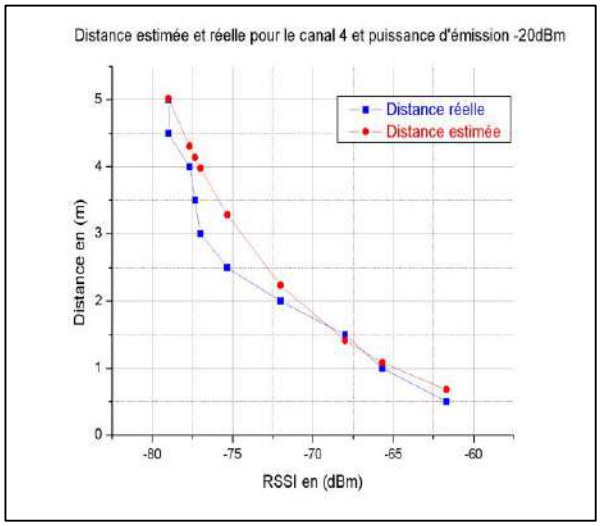


Figure 3.21. *RSSI en fonction de la distance réelle pour les cinq canaux à -20dBm.*

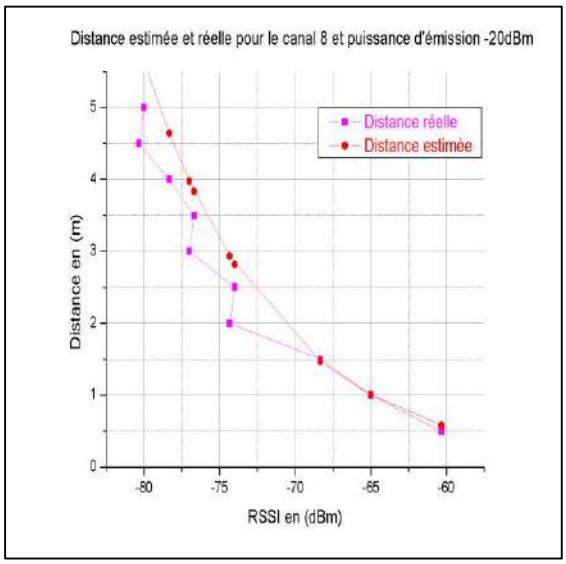
Cette figure montre que pour tous les canaux les RSSIs mesurés suivent une allure logarithmique.



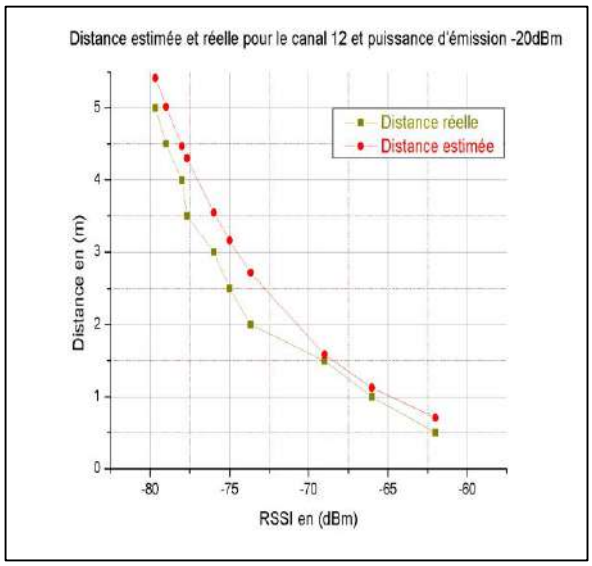
Courbe1 : *Canal 0.*



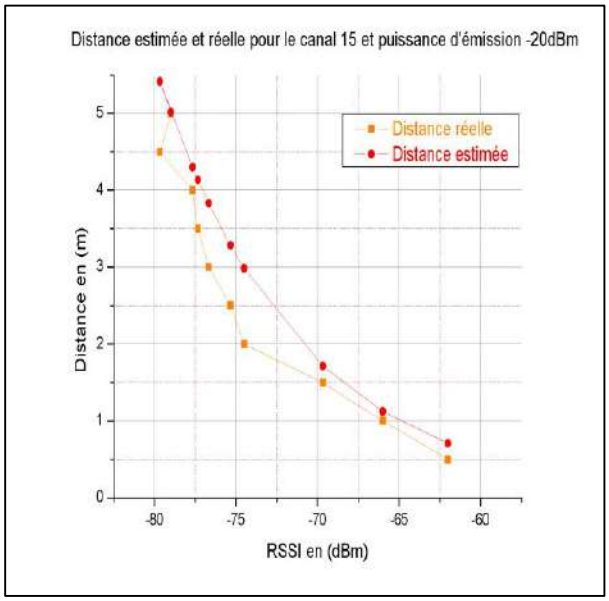
Courbe2 : *Canal 4.*



Courbe3 : *Canal 8.*

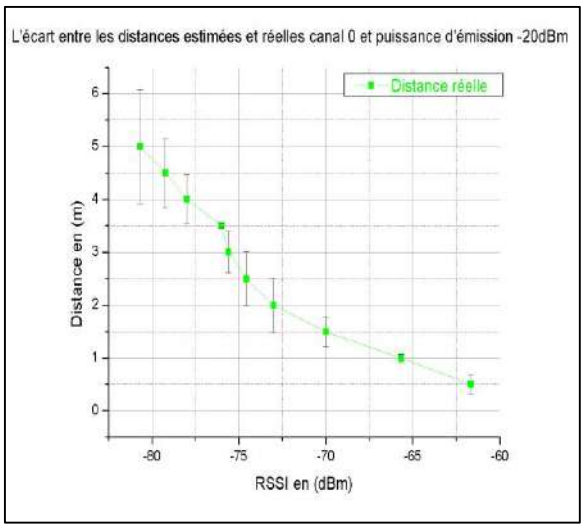


Courbe4 : *Canal 12.*

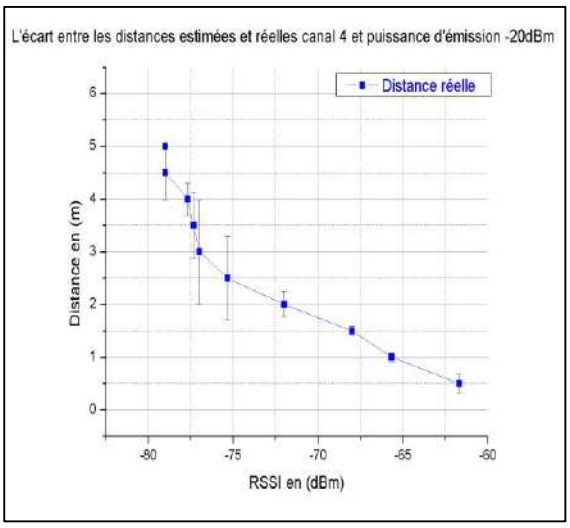


Courbe5 : *Canal 15.*

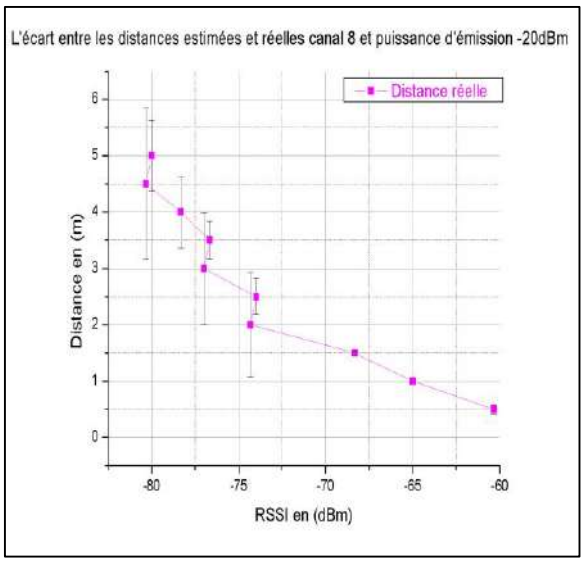
Figure 3.22. *Distances réelles et estimées pour les cinq canaux à -20dBm.*



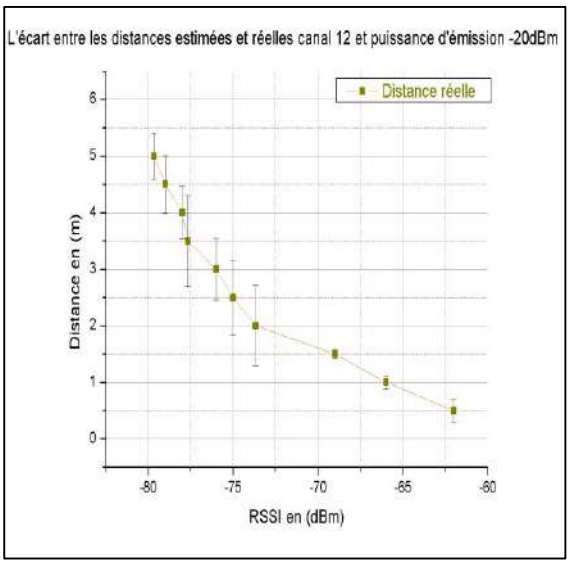
Courbe1 : *Canal 0.*



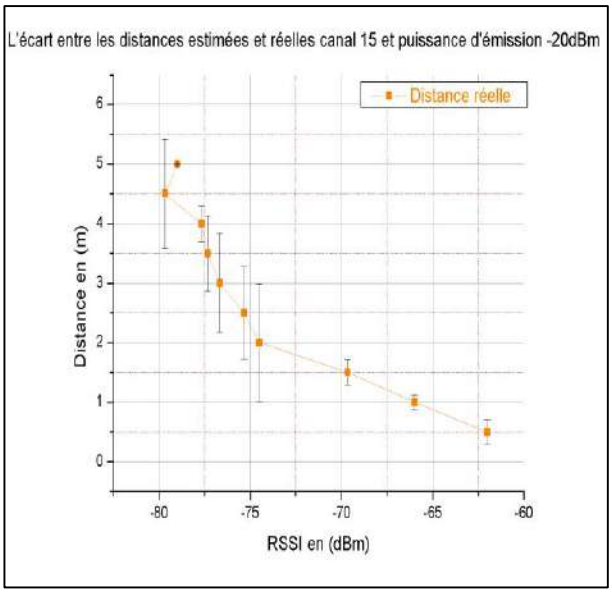
Courbe2 : *Canal 4.*



Courbe3 : *Canal 8.*



Courbe4 : *Canal 12.*



Courbe5 : *Canal 15.*

Figure 3.23. *L'écart entre les distances réelles et estimées pour les cinq canaux a -20dBm.*

On constate d'après les courbes de la figure 3.22, que tous les canaux sont presque identiques jusqu'à 1.5mètre, au-delà de cette distance, ont un écart important même pour le canal 4.

Les courbes de la figure 3.23 montre l'évolution des écarts, à partir de 1.5 mètre jusqu'à 5 mètres.

Le calcul du RMSE montre le bon canal qui donne une faible erreur.

Le tableau 3.5 montre les valeurs des RMSE pour tous les canaux.

Tableau 3.5. *Les valeurs d'erreurs RMSE pour les canaux utilisé à -20dBm.*

Les canaux	Canal 0	Canal 4	Canal 8	Canal 12	Canal 15
RMSE (m)	0.51	0.49	0.68	0.51	0.61

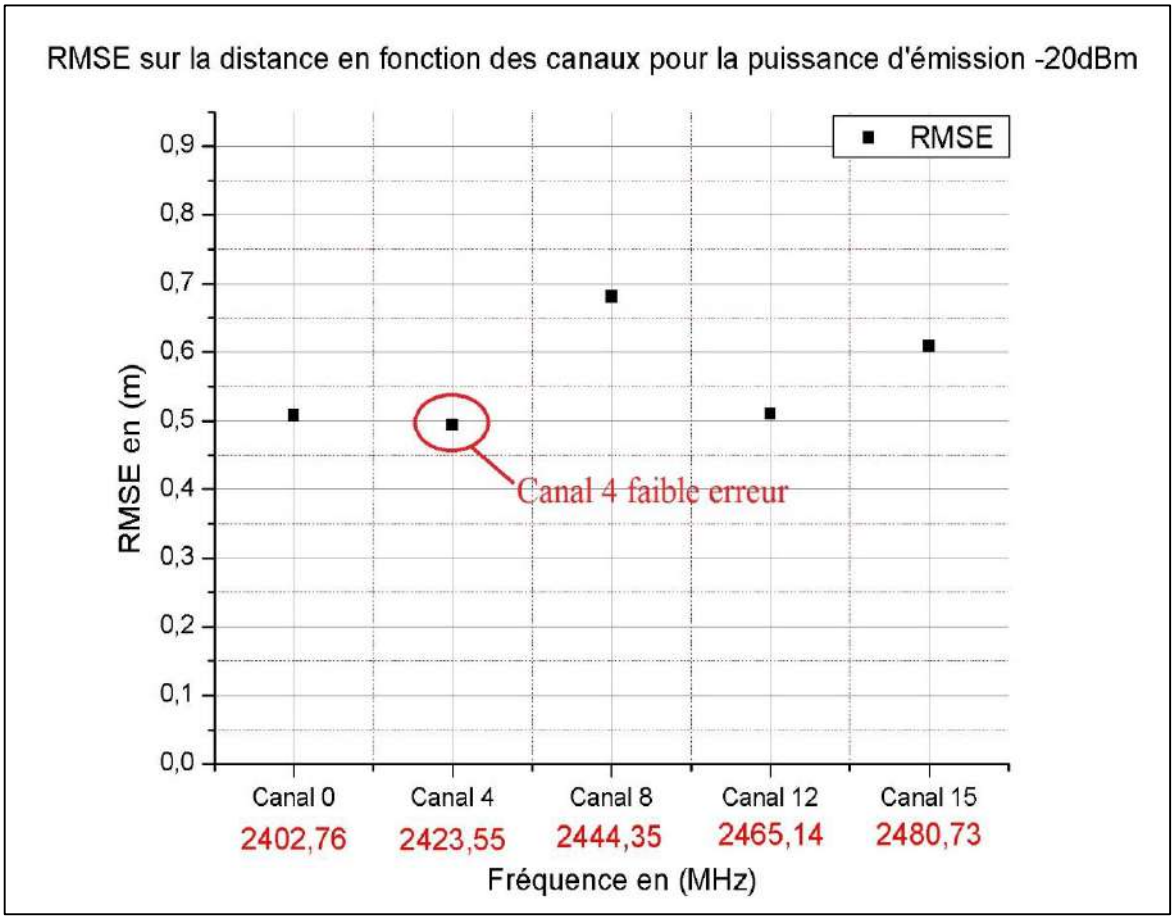


Figure 3.24. *L'évolution de l'erreur RMSE en fonction canal de transmission à -20dBm.*

Conclusion 3

Avec une puissance d'émission de -20 dBm, l'erreur minimale est de 0.49409 mètre est obtenue avec le canal 4.

4.4. Quatrième expérience

Les mêmes étapes doit être répéter dans cette expérience, mais avec une puissance d'émission de -30dBm.

La figure 3.25 montre les RSSIs mesurés en fonction des distances réelles. Comparées avec l'équation théorique *(EQ : 3.2)*.

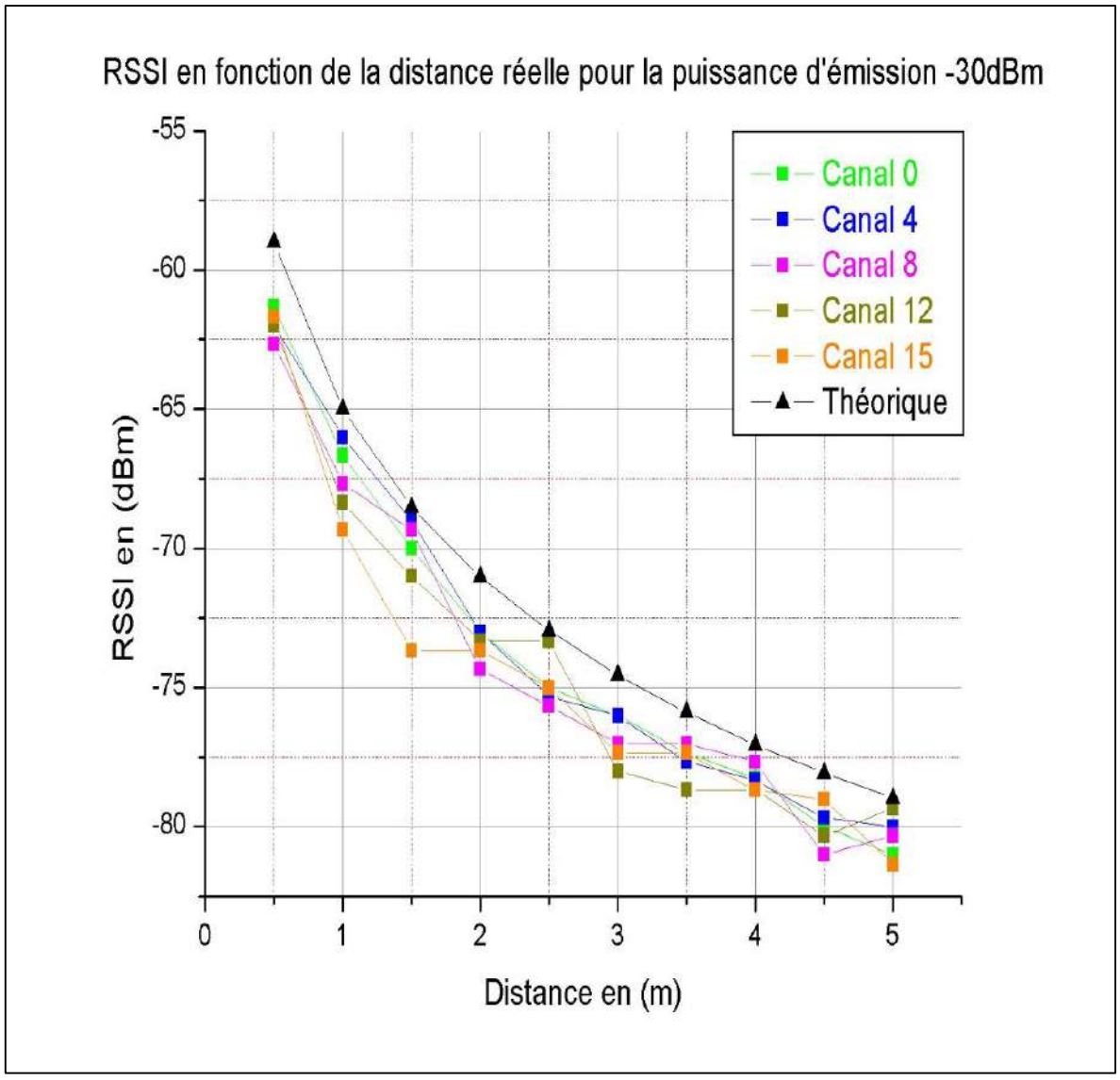
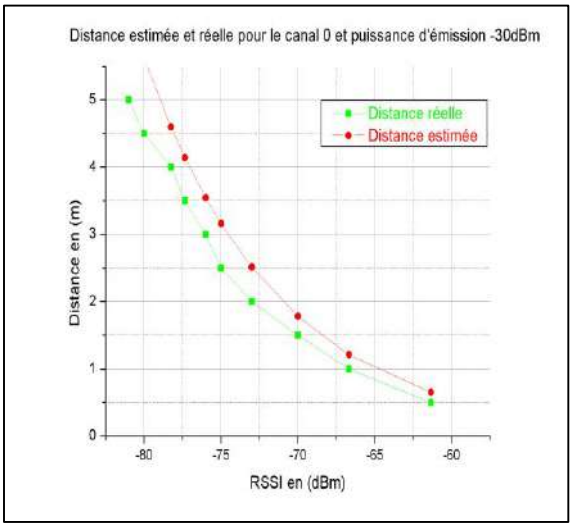
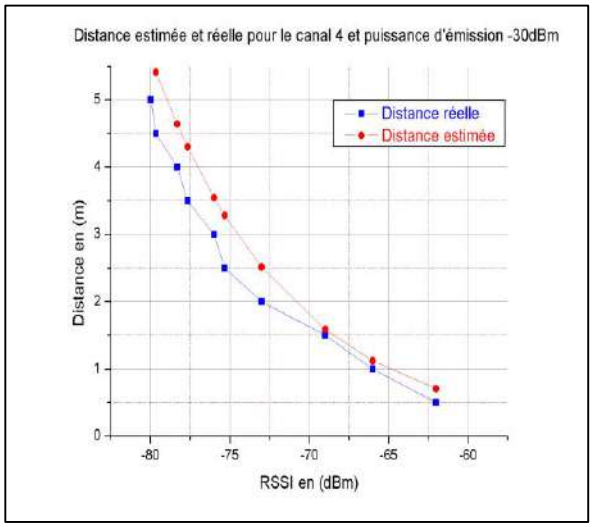


Figure 3.25. *RSSI en fonction de la distance réelle pour les cinq canaux à -30dBm.*

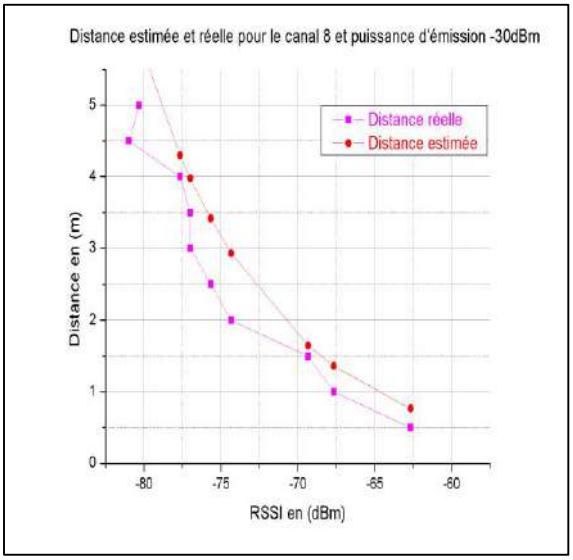
La figure 3.25 montre que seules les deux courbes correspondent aux canaux 0 et 4 qui suivent une trajectoire logarithmique.



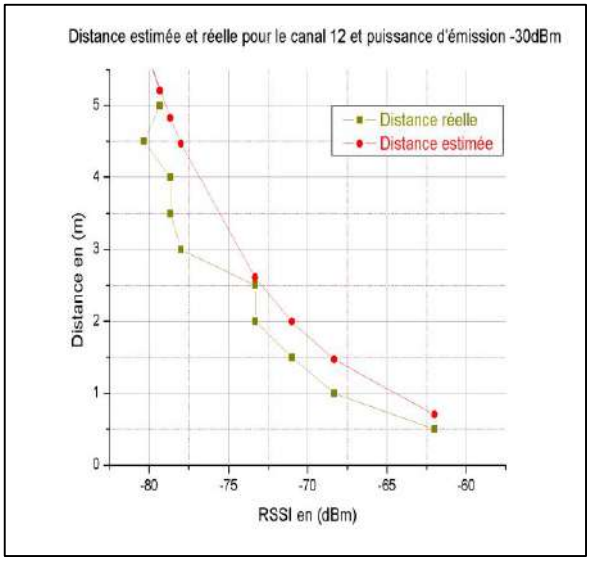
Courbe1 : *Canal 0.*



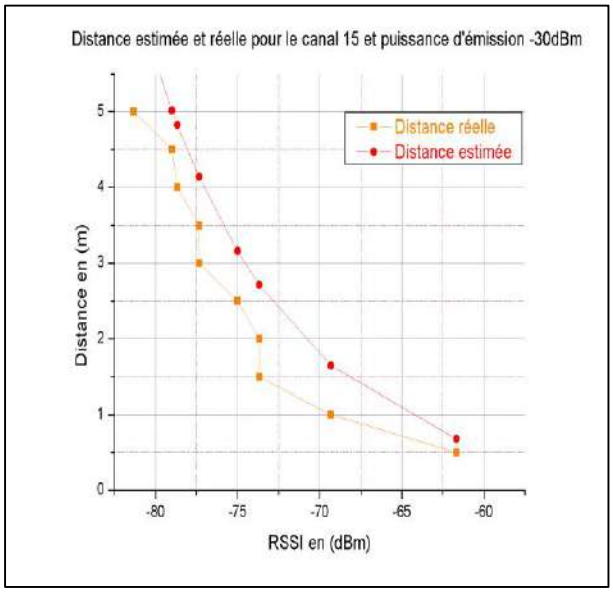
Courbe2 : *Canal 4.*



Courbe3 : *Canal 8.*

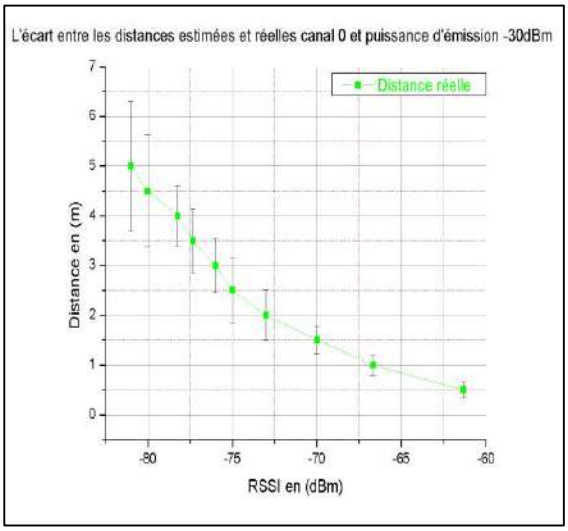


Courbe4 : *Canal 12.*

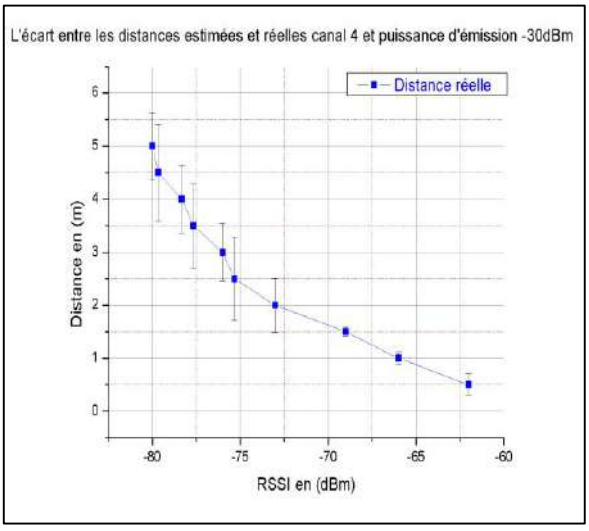


Courbe5 : *Canal 15.*

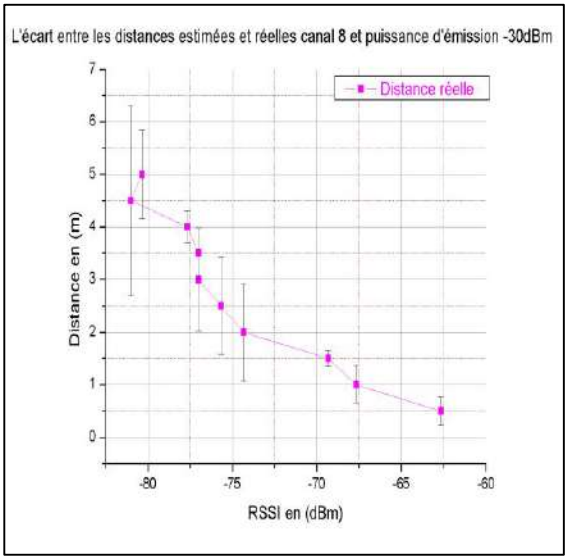
Figure 3.26. *Distances réelles et estimées pour les cinq canaux à -30dBm.*



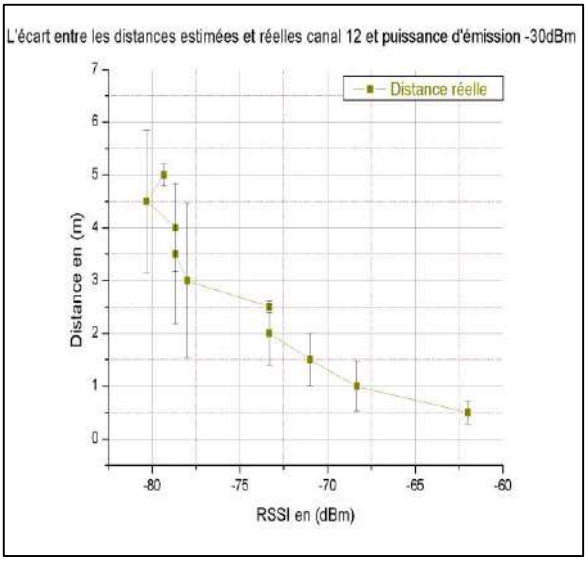
Courbe1 : *Canal 0.*



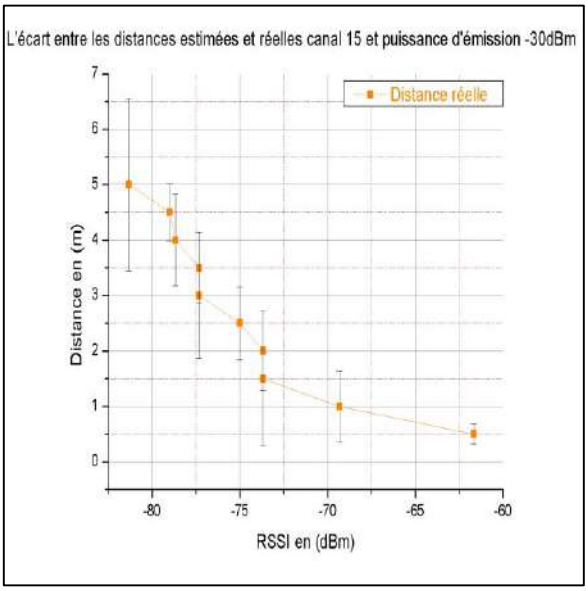
Courbe2 : *Canal 4.*



Courbe3 : *Canal 8.*



Courbe4 : *Canal 12.*



Courbe5 : *Canal 15.*

Figure 3.27. *L'écart entre les distances réelles et estimées pour les cinq canaux a -30dBm.*

Les courbes de la figure 3.26 montrent que pour le canal 4 l'allure de la distance estimée est presque la même que celle de la distance réelle, jusqu' à une distance de 1.5mètre et suit une allure exponentielle de l'équation *(EQ : 3.5)*, l'écart entre les distances estimées et réelles augmente à partir de cette distance. Pour les autres canaux, il est remarquable que les distances réelles ne suivent pas une allure exponentielle.

Pour le canal 0, la courbe de la distance estimée suit une allure exponentielle mais d'une manière amplifie.

Les écarts représentants par la figure 3.27 sont très important à cause de la faible puissance d'émission de -30dBm. Le tableau 3.6 montre les valeurs d'erreur RMSE de distance pour tous les canaux.

Tableau 3.6. *Les valeurs d'erreurs RMSE pour les canaux utilisé à -30dBm.*

Les canaux	Canal 0	Canal 4	Canal 8	Canal 12	Canal 15
RMSE (m)	0.67	0.59	0.84	0.86	0.89

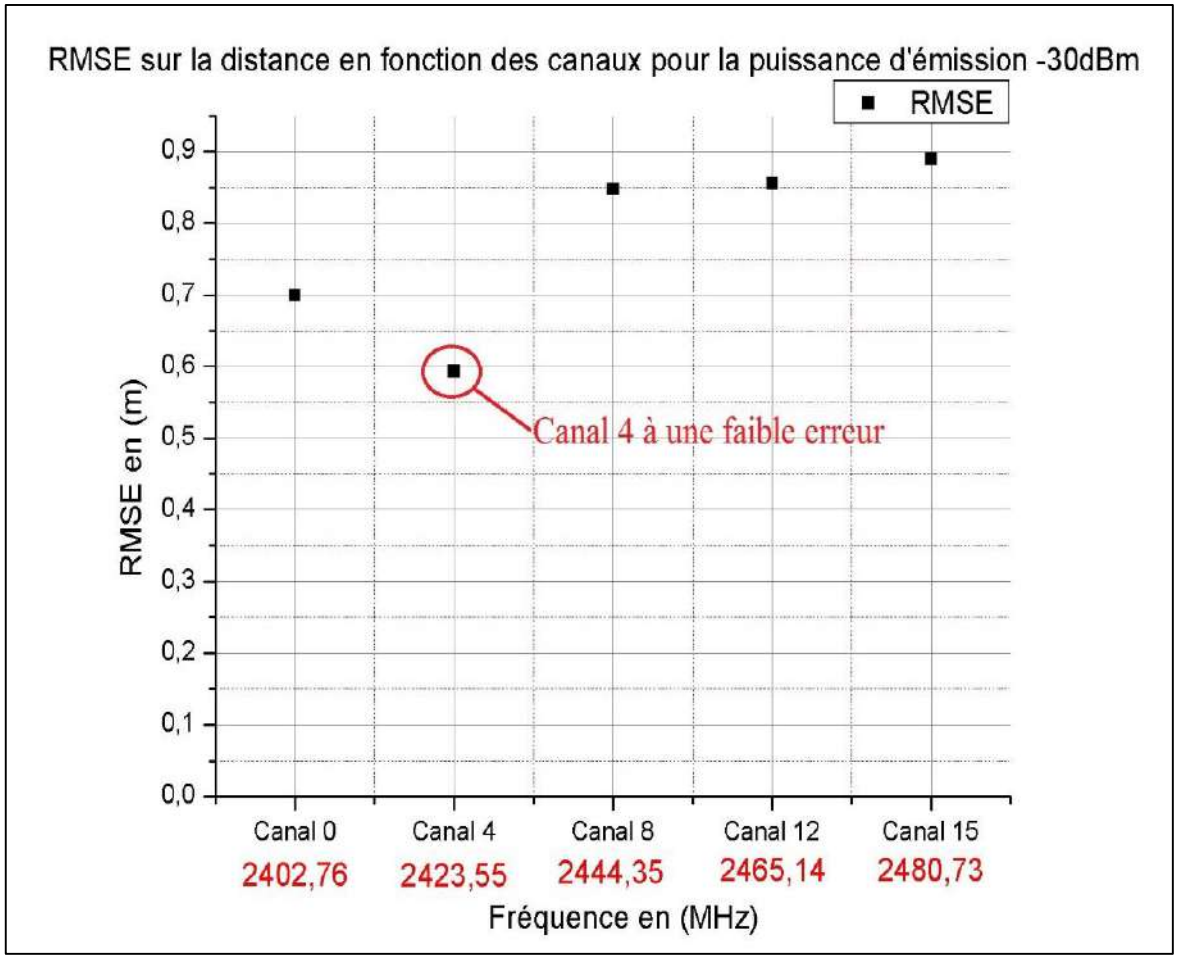


Figure 3.28. *L'évolution de l'erreur RMSE en fonction canal de transmission à -30dBm.*

Conclusion 4

Le canal 4 reste toujours le meilleur canal de transmission même avec une faible puissance d'émission de -30 dBm.

4.5. Choix de meilleure puissance d'émission

Pour choisir une meilleure puissance d'émission qui donne une fiable erreur d'estimation de distance, on fixe le meilleur canal de transmission trouvé durant ces expériences (canal 4) et on présente l'évolution de l'RMSE en fonction des puissances d'émission utilisées. Figure 3.29.

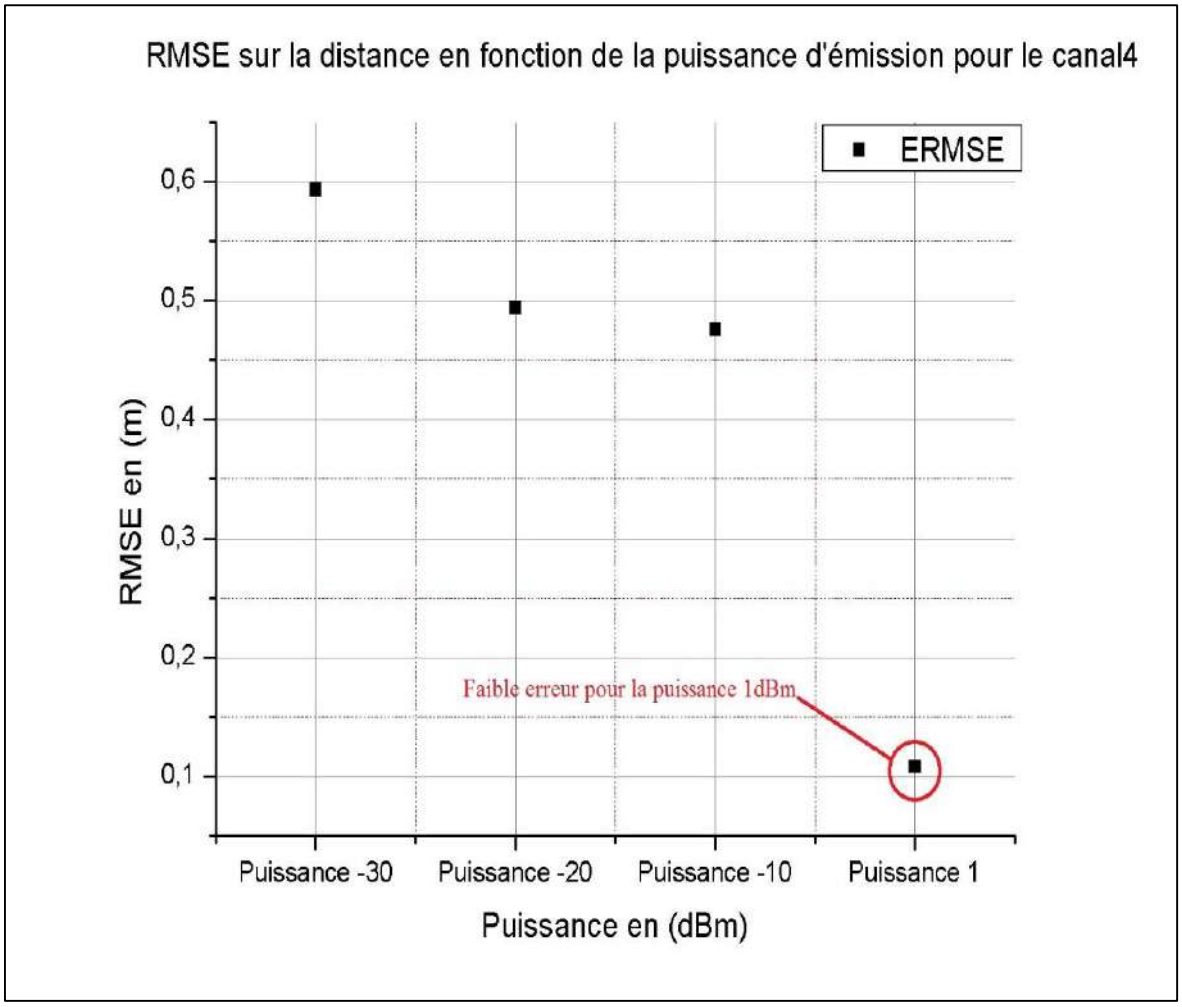


Figure 3.29. *L'évolution de RMSE en fonction de la puissance de transmission au canal 4.*

Cette courbe montre que la puissance d'émission de 1 dBm donne une faible erreur sur l'estimation des distances RMSE égale à 0.10844 mètre. La figure 3.30 regroupe l'évolution des RMSEs en fonction des canaux de transmission pour toutes les puissances d'émission utilisées.

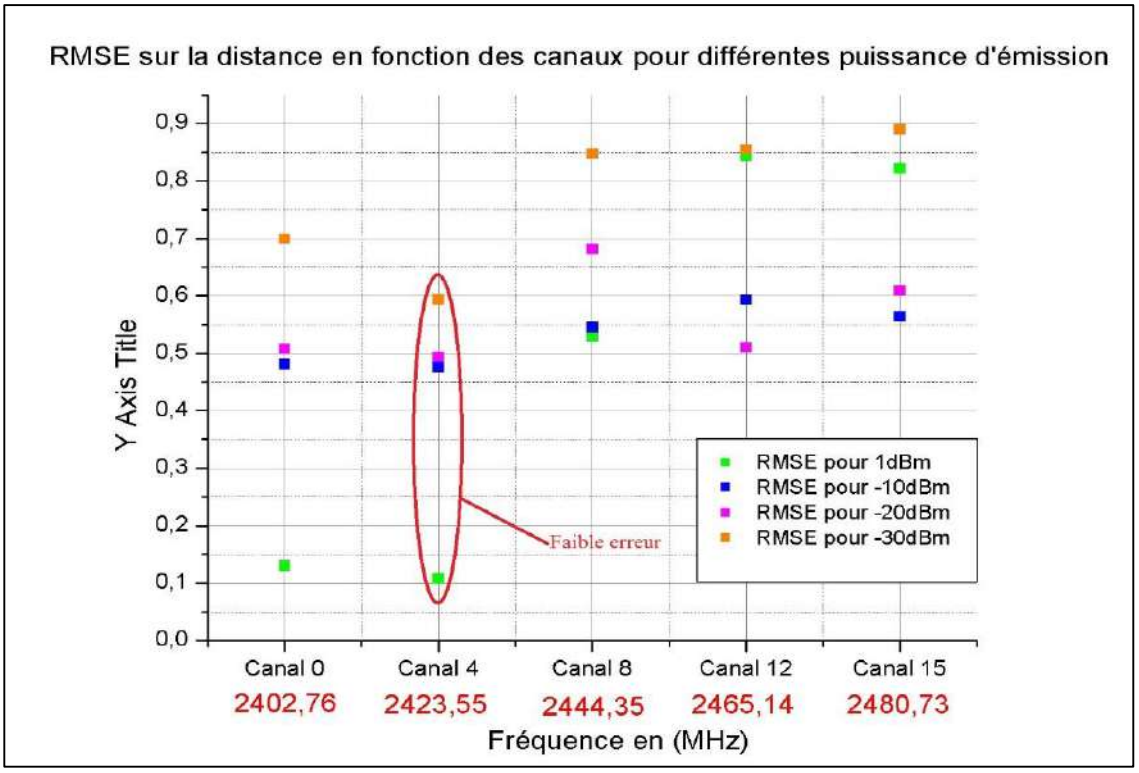


Figure 3.30. *L'évolution de toutes les puissances en fonction des canaux de transmission.*

La figure 3.30 montre que le choix du canal 4 donne une faible erreur RMSE pour n'importe quelles puissances d'émission utilisées et montre aussi que la puissance d'émission de 1 dBm est la plus fiable à être utilisée avec le canal 4 afin d'avoir une très faible erreur d'estimation de distance.

On remarque que pour n'importe quel canal de transmission utilisé moins la puissance d'émission diminue plus l'erreur RMSE augmente.

5. Validation des résultats trouvés

On atteint que le canal 4 donne des bonnes résultats concernant l'estimation de distance par rapport aux autre canaux, la figure 3.31 représente l'encombrement et l'occupation spectrale de la bande ISM et montre que le canal 4 correspondre au CH15 dans la bande ISM est complètement isolé des autres canaux qui n'utilisent le wifi et le Bluetooth. Alors que pour les autres canaux sont interférés par des fréquences WIFI et Bluetooth. En plus, la bande ISM devient plus encombré jour par jour à cause de l'utilisation des appareils qui occupent cette bande de fréquence comme : Téléphone sans fil, fours à micro-ondes, manettes de jeu sans fil, les jouets, les périphériques de PC sans fil, appareils audio et bien d'autres appareils.

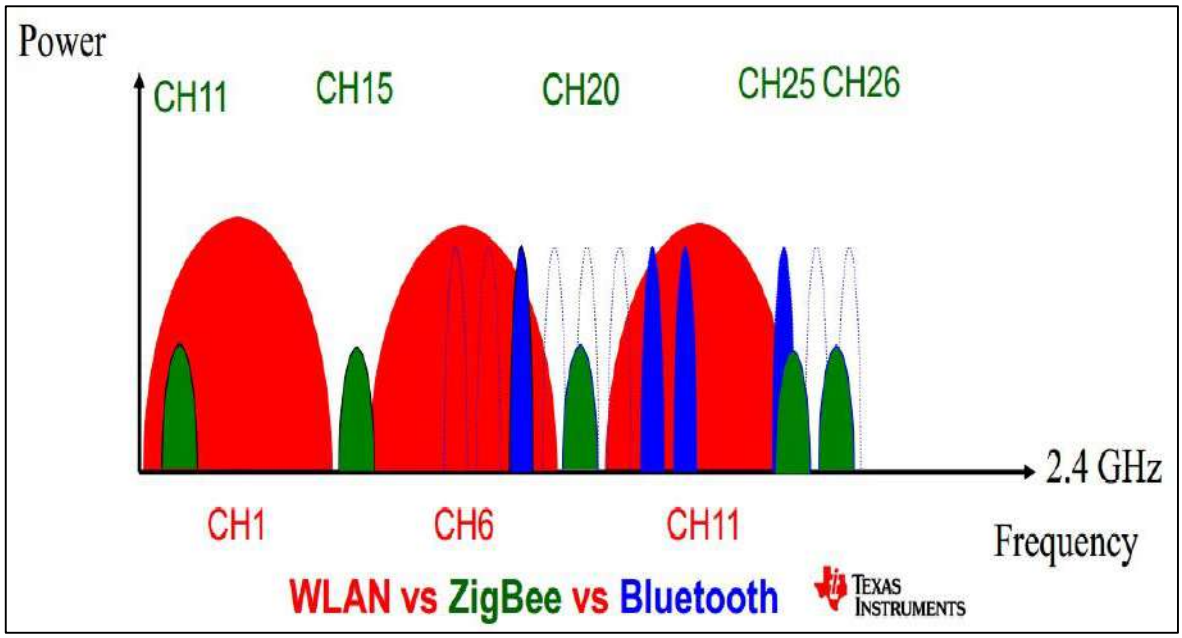


Figure 3.31. *L'encombrement spectral de la bande ISM.* **[35]** et **[31]**

Notre validation a été accomplie par un document **[35]** **[31]** fourni par la société TI pour (*Low Power Radio Frequency*) concernant les capteurs EZ430-RF2500.

[35][31][36] La bonne qualité dépend fortement d'un bon choix des paramètres de radio fréquence. Par conséquent une stratégie conçue en fonction de l'application devrait être précise. Voici quelques recommandations pour le choix de RF :

- ✓ Essayer l'émission et la réception des capteurs.
- ✓ La bonne mesure de l'indicateur de signal reçue.
- ✓ Le choix de bonne puissance de transmission.
- ✓ Eviter l'interférence entre les canaux adjacents.
- ✓ Vérifie la consommation actuelle et particulièrement en mode réception.
- ✓ Le bon choix de fréquence.

6. Conclusion

On a vérifié soigneusement l'impact de la fréquence de transmission et la puissance d'émission sur l'estimation des distances dans les réseaux de capteurs sans fils et on a prouvé par des expériences que le canal 4 et la puissance d'émission de 1 dBm donne une faible erreur RMSE de 0.10844 mètre dans le cas où on utilise des capteurs MSP 430 et l'équation du bilan de liaison validé par **[25]** dans un milieu extérieur.

La réponse à notre question de départ est la suivante :

Si on considère le RSSI comme métrique d'estimation des distances dans le domaine de localisation des capteurs sans fils MSP 430 et pour avoir la meilleur précision de localisation de ces derniers nos résultats montrent que le choix du canal 4 et la puissance d'émission de 1 dBm donnent une faible erreur sur l'estimation des distances.

Conclusion Générale

La localisation des capteurs est un problème crucial dans les réseaux de capteurs. Pour le résoudre, la méthode nous permet d'estimer les positions inconnues des capteurs, à partir des mesures de portée inter-capteurs et de la position connue d'une fraction de capteurs.

La technique suivie dans la localisation des capteurs est l'estimation des distances ensuite la dérivation des positions des capteurs qui respectent aux mieux les distances estimées.

L'estimation des distances est l'un parmis des problèmes liés à ces réseaux dans la localisation des capteurs et on constate que la résolution de ce type de problème est indispensable pour contribuer à la localisation.

Vu la faible puissance et la haute fréquence du signal radio, ce dernier est très influencé par les propriétés et les paramètres de l'environnement de déploiement, donc si on considère le RSSI comme métrique pour la localisation, il faut prendre en compte les paramètres qui influent sur l'évaluation du RSSI.

Les résultats des expériences réalisées ont montré que la puissance d'émission et le canal de transmission sont deux facteurs qui influent sur la mesure du RSSI et un bon choix de ces deux paramètres qui nous a conduits à une bonne mesure de RSSI qui estime les distances avec une faible erreur.

Plusieurs études montrent que l'estimation de la distance basée sur le RSSI est influencée par l'environnement. **[25]** a réalisé les conditions favorable avec une puissance d'émission de -16 dBm et le canal 0 et il a atteint une erreur de **0.47 mètre**.

Les résultats de nos expériences ont montré que le canal 4 et la puissance d'émission de 1 dBm donnent une bonne mesure des RSSIs qui conduit à une faible erreur d'estimation des distances **RMSE** de **0.11 mètre** alors des meilleurs résultats.

Cette erreur peut être encore réduite, si on utilise un modèle mathématique de l'équation du bilan de liaison propre pour chaque canal de transmission et puissance démission.

Même si les objectifs de notre recherche ont été atteints, nous pouvons citer quelques limitations liées à cette recherche. Tout d'abord, nos expériences ont été réalisées à l'aide de trois capteurs, les deux premiers comme des nœuds et l'autre comme une station de base.

Donc, les valeurs des RSSI récolté proviennent à partir de deux capteurs seulement, alors que l'utilisation de plusieurs capteurs pourrait nous garantir de meilleurs résultats.

Le respect du calendrier tracé par Monsieur Le Promoteur nous a conduits aux résultats de recherche obtenus.

Perspectives et travaux futurs

Les perspectives ouvertes par ces travaux sont nombreuses et variées. Dans la continuité de nos travaux, nous envisageons d'exploiter :

- L'utilisation de différentes modes de modulation qui peuvent augmenter les performances de mesure de distance.
- L'exploitation d'autres techniques d'estimation de distance, en utilisant le canal 15 (canal4).

Les travaux futurs devraient être orienter vers les points suivants :

- Implémenter des systèmes capables de bien détecter et éviter l'interférence entre deux canaux adjacents.
- Production des capteurs et développement des programmes capables de changer le canal d'une manière automatique afin, d'éviter les canaux les plus encombrants.
- L'amélioration de la partie alimentation, surtout que l'énergie est très importante pour la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil. En effet, il est souhaitable de concevoir des nouvelles générations des capteurs qui s'alimentent énergétiquement de façon autonome. Par exemple, on pourrait implémenter à ces capteurs des équipements qui sont capables de produire l'énergie comme : les panneaux solaires, la technologie piézo-électrique ou d'autres types d'énergie renouvelables.

ANNEXE

Annexe A :

➢ *Les packages installés avec cygwin* :

Python **:** Python est un langage qui peut s'utiliser dans de nombreux contextes et s'adapter à tout type d'utilisation grâce à des bibliothèques spécialisées à chaque traitement. Il est cependant particulièrement utilisé comme langage de script pour automatiser des tâches simples mais fastidieuses comme par exemple un script qui récupérerait la météo sur Internet ou qui s'intégrerait dans un logiciel de conception assistée par ordinateur afin d'automatiser certains enchaînements d'actions répétitives.

Gnuplot : Gnuplot est un programme souple qui peut produire des représentations graphiques en deux ou trois dimensions de fonctions numériques ou de données. Le programme fonctionne sur tous les ordinateurs et systèmes d'exploitation principaux et peut envoyer les graphiques à l'écran ou dans des fichiers dans de nombreux formats. Gnuplot utilise également l'algorithme de Levenberg-Marquard pour ajuster les paramètres d'une fonction numériques sur des données expérimentales.

Numpy : Numpy est une extension du langage de programmation Python, destinée à manipuler des matrices ou tableaux multidimensionnels.

Gcc-g++ : **GNU** Compiler Collection, abrégé en **GCC**, est un ensemble de compilateurs créés par le projet **GNU**. Les compilateurs sont des logiciels libres intégrés capables de compiler divers langages de programmation, dont **C**, **C++**, Objective-C, Java, Ada et Fortran.

GCC est utilisé pour le développementde la plupart des logiciels libres. Le noyau Linuxdépend notamment étroitement des fonctionnalités de **GCC**.

Annexe B :

➢ *Le programme* txrx_wsn.c *pour l'estimation des distances :*

```
//------------------------ Le code source du programme txrx_wsn.c :
pour l'estimation des distances -------------------------------//

        #include <stdio.h>
        #include "bsp.h"
        #include "mrfi.h"
        #include "bsp_leds.h"
        #include "gradient.h"
        #include "printing.h"
        #include "bsp_buttons.h"
        #include "sensing.h"
        #include "radios/family1/mrfi_spi.h" // Bibliothèque pour
        les applications radio CC2500.

        uint8_t wakeup_cycles_before_send = SEND_PERIOD;

        int main(void)
        {
          WDTCTL = WDTPW + WDTHOLD; // désactiver le chient de
                                                    garde.
          BSP_Init();
          MRFI_Init();
          mrfiSpiWriteReg(CHANNR,0xFC);// changer le fréquence
          mrfiSpiWriteReg(PATABLE,0xFF);// changer la puissance
          gradient_Init(IS_SINK_NODE);
          __bis_SR_register(GIE+LPM0_bits); // Annuler
             l'interruption globalement utlisant le mode cosmation
             d'energie LPM0 ce mode laisser seulment le Timer_A0
             'ALCK' fonctionner.
        }

        #pragma vector=TIMERA0_VECTOR
        __interrupt void Timer_A0 (void)
        {
          print_interrupt("\r\nTIMERA0",9); //Changer le période de
                                    TIMERA0 aléatoirement.
          // change TIMERA0 period randomly
          uint16_t fixed_part, random_part, random;
          fixed_part     = 1500*WAKEUP_PERIOD_S_FIXED; // Allumer
                        la radio dans un peride de temps.
          random_part    = WAKEUP_PERIOD_S_RANDOM;
          if (WAKEUP_PERIOD_S_RANDOM!=0) {
            random_part |= MRFI_RandomByte();
            random_part |= (MRFI_RandomByte()<<8); // la taille des
                   bits échanger dans la partie radio est <<8.
            random_part  =
        random_part%(1500*WAKEUP_PERIOD_S_RANDOM);
          }
```

```
  random          = fixed_part + random_part;
  TACTL = MC_0;
  TAR = 0;
  TACCR0 = random;
  TACTL = TASSEL_1 + MC_1 + ID_3;
  //ajoutez le message de données à l'amortisseur
  wakeup_cycles_before_send--;
  if (wakeup_cycles_before_send==0) {
    gradient_generate_data();
    wakeup_cycles_before_send=SEND_PERIOD;
  }
  //envoyez le message protégé le plus ancien.
  gradient_send_data();
}

#pragma vector=TIMERB0_VECTOR
__interrupt void Timer_B0 (void)
{
  print_interrupt("\r\nTIMERB0",9);
  gradient_wakeup_timer();// Allumer le TIMERB0.
}

#pragma vector=TIMERB1_VECTOR
__interrupt void Timer_B1 (void)
{
  print_interrupt("\r\nTIMERB1",9);
  gradient_wakeup_timer();// Allumer le TIMERB1.
}

void MRFI_RxCompleteISR()
{
  print_interrupt("\r\nRX",4);
  BSP_TOGGLE_LED1();
  gradient_wakeup_rx();
  BSP_TOGGLE_LED1();
}

#pragma vector=PORT1_VECTOR
__interrupt void Port_1 (void)
{
  P1IFG &= ~0x04;    // désactiver l'interuption par le
bouton.
  print_interrupt("\r\nPORT1",7);
}

#pragma vector=ADC10_VECTOR
__interrupt void ADC10_ISR(void)
{
  print_interrupt("\r\nADC10",7);
    __bic_SR_register_on_exit(CPUOFF); // désactiver le CPU.
}

/*#pragma vector=USCIAB0RX_VECTOR
  __interrupt void serialRx (void)
{
  P1OUT ^= 0x03;
```

```
  IFG2 &= ~0x01;
}

#pragma vector=USCIAB0TX_VECTOR
__interrupt void serialTx (void)
{
  P1OUT ^= 0x03;
  IFG2 &= ~0x02;
}*/

//------------------------------[FIN]------------------------------//
```

➢ ***Le programme* txrx_wsn.py *pour visualiser la carte du réseau virtuel :***

```
//----------------------- Le code source du programme txrx_wsn.py :
pour la visualisation de la carte réseau -----------------------//

#!/usr/bin/env python
import re, Gnuplot, sys, random, time
if __name__ == '__main__':
     print 'display started...'
     threshold_remove_node = 50
     g = Gnuplot.Gnuplot(debug=1)
     char = ''
     line = ''
     nodes_id            = []
     nodes_sink          = []
     nodes_coord_x       = []
     nodes_coord_y       = []
     nodes_temperature   = []
     nodes_voltage       = []
     nodes_seqnum        = []
     nodes_timelastheard = []
     link_start          = []
     link_end            = []
     link_rssi           = []
     while 1:
          char = sys.stdin.read(1)
          if char == '\n':
               ########################retrieve the data
               items1 = line.split()
               receiver    = items1[0]
               sender      = items1[1]
               seqnum      = items1[2]
               temperature = items1[3]
               voltage     = items1[4]
               rssi        = items1[5]
               items2=items1[6].split(':')
               items3=items2[1].split(',')
               neighbor_id   = []
```

```
                neighbor_rssi = []
                for i in range(len(items3)):
                     items4 = items3[i].split('@')
                     neighbor_id.append(items4[0])
                     neighbor_rssi.append(items4[1])
                items2=items1[7].split(':')
                path=items2[1].split(',')
                ######################populate the tables
                if nodes_id.count(receiver)==0:
#add receiver to "nodes"
                     nodes_id.append(receiver)
                     nodes_sink.append(0)
                     nodes_coord_x.append(random.randint(0,100))
                     nodes_coord_y.append(random.randint(0,100))
                     nodes_temperature.append("?")
                     nodes_voltage.append("?")
                     nodes_seqnum.append("?")
                     nodes_timelastheard.append(time.time())
                if nodes_id.count(sender)==0:
#add sender to "nodes"
                     nodes_id.append(sender)
                     nodes_sink.append(0)
                     nodes_coord_x.append(random.randint(0,100))
                     nodes_coord_y.append(random.randint(0,100))
                     nodes_temperature.append(temperature)
                     nodes_voltage.append(voltage)
                     nodes_seqnum.append(seqnum)
                     nodes_timelastheard.append(time.time())
                else:
#update data of already added "nodes"
                     nodes_temperature[nodes_id.index(sender)] =
temperature
                     nodes_voltage[nodes_id.index(sender)] =
voltage
                     nodes_seqnum[nodes_id.index(sender)] = seqnum
                     nodes_timelastheard[nodes_id.index(sender)] =
time.time()
                for i in range(len(neighbor_id)):
#add neighbor nodes to "nodes"
                     if nodes_id.count(neighbor_id[i])==0:
                          nodes_id.append(neighbor_id[i])
                          nodes_sink.append(0)

     nodes_coord_x.append(random.randint(0,100))
     nodes_coord_y.append(random.randint(0,100))
                          nodes_temperature.append("?")
                             nodes_voltage.append("?")
                          nodes_seqnum.append("?")
                          nodes_timelastheard.append(time.time())
                for i in range(len(path)):
                     if nodes_id.count(path[i])==0:
#add nodes on route to "nodes"
                          nodes_id.append(path[i])
                          nodes_sink.append(0)

     nodes_coord_x.append(random.randint(0,100))
```

```
     nodes_coord_y.append(random.randint(0,100))
                              nodes_temperature.append("?")
                                 nodes_voltage.append("?")
                              nodes_seqnum.append("?")
                              nodes_timelastheard.append(time.time())
                    index = 0
                    maximum = len(link_start)
                    while index < maximum:
#remove all sender's neighbors from "links"
                         if link_start[index] == sender or
link_end[index] == sender:
                              link_start.pop(index)
                              link_end.pop(index)
                              link_rssi.pop(index)
                              index=index-1
                              maximum = maximum-1
                         index=index+1
                    index_path = 0
#remove hops on the path from "links"
                    maximum_path = len(path)
                    while index_path < maximum_path-1:
                         index = 0
                         maximum = len(link_start)
                         while index < maximum:
                              if (link_start[index] ==
path[index_path] and link_end[index] == path[index_path+1]) or
(link_start[index] == path[index_path+1] and link_end[index] ==
path[index_path]):
                                   link_start.pop(index)
                                   link_end.pop(index)
                                   link_rssi.pop(index)
                                   index=index-1
                                   maximum = maximum-1
                              index=index+1
                         index_path=index_path+1
                    for i in range(len(neighbor_id)):
#add all neighbors from sender
                         link_start.append(sender)
                         link_end.append(neighbor_id[i])
                         link_rssi.append(neighbor_rssi[i])
                    proceed = 1
#add last link with RSSI in "links"
                    for i in range(len(link_start)):
                         if (link_start[i] == path[len(path)-2] and
link_end[i] == receiver) or (link_start[i] == receiver and
link_end[i] == path[len(path)-2]):
                              proceed = 0
                              break
                    if proceed == 1:
                         link_start.append(path[len(path)-2])
                         link_end.append(receiver)
                         link_rssi.append(rssi)
                    #declare last node on path as sink
                    nodes_sink[nodes_id.index(path[len(path)-1])] = 1
                    ######################remove old information
```

```
                for i in range(len(nodes_id)):
#remove links
                    if ((time.time()-
nodes_timelastheard[i]>threshold_remove_node) and
                    (nodes_sink[i]==0)):
                         index = 0
                         maximum = len(link_start)
                         while index < maximum:
                              if (link_start[index]==nodes_id[i]
or link_end[index]==nodes_id[i]):
                                   link_start.pop(index)
                                   link_end.pop(index)
                                   link_rssi.pop(index)
                                   index = index - 1
                                   maximum = maximum - 1
                              index = index + 1
                index = 0
#remove nodes
                maximum = len(nodes_id)
                while index < maximum:
                    if ((time.time()-
nodes_timelastheard[index]>threshold_remove_node) and
(nodes_sink[index]==0)):
                         nodes_id.pop(index)
                         nodes_sink.pop(index)
                         nodes_coord_x.pop(index)
                         nodes_coord_y.pop(index)
                         nodes_temperature.pop(index)
                         nodes_voltage.pop(index)
                         nodes_seqnum.pop(index)
                         nodes_timelastheard.pop(index)
                         index = index - 1
                         maximum = maximum - 1
                    index = index + 1
                       ######################plot
                g('reset')
                g('set term x11 title "eZWSN network visualizer"')
                g('set xrange [0:100]')
                g('set yrange [0:100]')
                g('set format x ""')
                g('set format y ""')
                g('set noxtics')
                g('set noytics')
                g('set noborder')
                g('set pm3d')
                g('set cbrange [-110:-30]')
                g('set palette model RGB defined (-110 \"red\",  -
90 \"orange\", -70 \"yellow\", -50 \"green\", -30 \"dark-
green\")')
                g('set size square')
                g('set data style points')
                for i in range(len(link_start)):
                    string = "set arrow from %s,%s to %s,%s
nohead lw 2 linecolor palette cb %f" %
(nodes_coord_x[nodes_id.index(link_start[i])],
```

```
nodes_coord_y[nodes_id.index(link_start[i])],

                nodes_coord_x[nodes_id.index(link_end[i])],

                nodes_coord_y[nodes_id.index(link_end[i])],

                int(link_rssi[i]))
                     g(string)
                for i in range(len(nodes_id)):
                     if (nodes_sink[i]==0):
                          string = "set label \"%s,%sV,seq=%s\" at
%s,%s" % (nodes_id[i], nodes_voltage[i], nodes_seqnum[i],
nodes_coord_x[i], nodes_coord_y[i])
                     else:
                          string = "set label \"%s\" at %s,%s
textcolor ls 1" % (nodes_id[i], nodes_coord_x[i],
nodes_coord_y[i])
                     g(string)
                data = []
                data.append([-1,-1])
                g.plot(data)
                line = ''
           else:
                line = line + char

//------------------------------[FIN]------------------------------//
```

Annexe C :

➢ *Le programme* txrx_noise.c *pour l'analyseur de spectre :*

```
//----------------- Le code source du programme txrx_noise.c : pour
l'Analyseur de spectre pour le choix des fréquences -------------//

        #include "mrfi.h"
        #include "radios/family1/mrfi_spi.h"
        void print_rssi(int8_t rssi)
        {
          char output[] = {" 000 "};
          if (rssi<0) {output[0]='-';rssi=-rssi;}
          output[1] = '0'+((rssi/100)%10);
          output[2] = '0'+((rssi/10)%10);
          output[3] = '0'+ (rssi%10);
          TXString(output, (sizeof output)-1);
        }
        int main(voi'd)
        {
          int8_t rssi;
          uint8_t channel;
          BSP_Init();
          MRFI_Init();
          P3SEL    |= 0x30;
          UCA0CTL1  = UCSSEL_2;
          UCA0BR0   = 0x41;      // synchroniser les Timers.
          UCA0BR1   = 0x3;
          UCA0MCTL  = UCBRS_2;
          UCA0CTL1 &= ~UCSWRST;
          MRFI_WakeUp();
          __bis_SR_register(GIE);// Annuler globalement
                                                    l'interruption.
          while(1) {
            for (channel=0;channel<252;channel++) {
              MRFI_RxIdle();
              mrfiSpiWriteReg(CHANNR,channel);// balayer tout la
        bande de fréquence de 0 à 252 canaux.
              MRFI_RxOn();
              rssi=MRFI_Rssi();
              print_rssi(rssi);
            }
            TXString("\n",1);
          }
        }
        void MRFI_RxCompleteISR()
        {
        }

//------------------------------[FIN]------------------------------//
```

➢ *Le programme* txrx_noise.py *pour visualiser le spectre :*

```
//---------------------- Le code source du programme txrx_noise.py :
pour visualisation de spectre des fréquences ----------------------//

        #!/usr/bin/env python
        import re, Gnuplot, sys
        if __name__ == '__main__':
            print 'display started...'
            g = Gnuplot.Gnuplot(debug=1)
            g('set term x11 title "Master_Analyseur_de_spectre"')
            g('set yrange [-110:0]')
            g('set data style linespoints')
            g.xlabel('frequency (MHz)')
            g.ylabel('RSSI (dBm)')
            char = ''
            line = ''
            while 1:
           char = sys.stdin.read(1)
                if char == '\n':
               sline = line.split()
               data = []
               for i in range(len(sline)):
                try:
                      sline[i] = int(sline[i])
                except:
                      sline[i] = 0
                frequency = 2400.0+(0.331349206*i)//
                        data.append([frequency,sline[i]])
               g.plot(data)
               line = ''
                else:
               line = line + char
//-----------------------------[FIN]-----------------------------//
```

Annexe D :

➢ *Le programme txrx_simple.c pour la transmission continue d'un signal :*

```
//---------------- Le code source du programme txrx_simple.c : pour
la transmission d'un paquet d'une manière continue --------------//

        #include "mrfi.h"
        #include "radios/family1/mrfi_spi.h"
        int main(void)
        {
          BSP_Init();
          P1REN |= 0x04;// accès au MSP430 pour LED et Bouton
                                  Et l'horloge.
          P1IE |= 0x04;
          MRFI_Init();// pour contrôler le radio CC2500.
          mrfiSpiWriteReg(CHANNR,0xFC);// changer la fréquence de
                                              transmission.
          mrfiSpiWriteReg(PATABLE,0xFF);// changer la puissance
                                             d'émission.
          MRFI_WakeUp();// activer l'oscillateur de CC2500 en mode
          IDLE.
          MRFI_RxOn(); // CC2500 en mode réception.
          __bis_SR_register(GIE+LPM4_bits);
        }
        void MRFI_RxCompleteISR()
        {
          P1OUT ^= 0x02;
        }
        #pragma vector=PORT1_VECTOR
        __interrupt void Port_1 (void)
        {
          P1IFG |= 0x04; // Forcer l'interruption pour avoir une
        continuité de transmission.
          mrfiPacket_t packet; // Déclaration de paquet :
```

Entête (1 octet)	Source (4 octets)	Destination (4 octets)	La donnée (max 8 octets)

```
          packet.frame[0]=8+20; // déclarer l'entête utiliser.
          MRFI_Transmit(&packet, MRFI_TX_TYPE_FORCED);// copie dans
        le CC2500/TXFIFO et transmettre.
          P1OUT ^= 0x01;
        }

//-----------------------------[FIN]-----------------------------//
```

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

[1] A. Awad, " Efficient Data Management in Wireless Sensor Networks using Peer-to-Peer Techniques ", Doctorat, Génie Informatique Université D'Erlangen, Allemagne, 2009.

[2] S. Moad, " La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil ", Master Recherche2 en Informatique de L'IFSIC, Rennes 1, 2007/2008.

[3] Y. Xue, A. Gonzalez, A. Aguilar et M. Bartoux, " Agrégation de données dans les réseaux de capteurs ",Rapport final, Université de Technologie Compiègne (UTC), France, 2010.

[4] Z. Bouzidi, A. Benameur, "Mise en place d'un réseau de capteurs sans fil pour l'irrigation intelligente", Master en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2012.

[5] A. Khalil. Enan, " An Evolutionary Routing Protocol for Dynamic Clustering of Wireless Sensor Networks", Master en science de l'informatique, Université de Baghdad, Iraq, 2011.

[6] T. Houngbadji, " Réseaux Ad Hoc : Système D'Adressage Et Méthodes D'Accessibilité Aux Données ", Philosophiæ Doctor, Génie Informatique Université De Montréal, Canada, 2009.

[7] P. Shabnam, " Energy Consumption In Wireless Sensor Network", Master en informatique, Université D'OSLO, Département De L'informatique, Norvège, 2010.

[8] O. Ali Kara, " Développement d'une Architecture de Communication Sans Fil pour les Réseaux de Capteurs dans le Domaine Aérospatial ", Doctorat : Micro-ondes, Electromagnétisme et Optoélectronique Université De Toulouse III, France, 2011.

[9] F. Carlo, " Medium Access Control and IEEE 802.15.4 ", Royal Institute de technologie-KTH, Stockholm, 2011. Disponible : http://www.ee.kth.se/~carlofi/teaching/pwsn-2011/wsn_course.shtml.

[10] Y. Jongwon, K. Hyogon et K. Jeong-Gil, "Data Fragmentation Scheme in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks ", IEEE, Department of Computer Science and Engineering, université de Korie, pp.26-30, Korea, 2007.
Disponible : http://ieeexplore.ieee.org.www.sndl1.arn.dz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4212446.

[11] C. Gérard, " MaCARI : Une méthode d'accès d´déterministe et économe en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil", Doctorat en informatique, Université Blaise Pascal, France, 2009.

[12] N. Abdeddaim, " Analyse des performances d'un réseau de capteurs exploitant le standard IEEE 802.15.4", Doctorat en informatique Université De Grenoble, France, 5 Octobre 2012.

[13] Y. Chaallal, H. Bettahar et A. Bouabdallah, " Les Réseaux de capteurs (WSN)", Cour 1. HeuDiaSyc UMR CNRS 6599, Université de Technologie de Compiègne (UTC), France. 2008.
Disponible : http://moodle.utc.fr/file.php/498/Cours1/TI60_sensors_cours1.pdf.

[14] M. Belloula, " La géolocalisation dans les réseaux de capteurs sans fil. Etude de cas : utilisation en agriculture ", Magister en Ingénierie des Systèmes Informatiques (ISI), Université Hadj Lakhdar Batna, 26 janvier 2012.

[15] C. Baouche, " Une solution tolérante aux délais pour des applications de localisation et de traçabilité a posteriori en milieux confinés", Doctorat en informatique, Ecole Doctorale Sciences Pour L'Ingenieur De Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal, France,2012.

[16] W. Dargie, C. Poellabauer, *Fundamentals of wireless sensor networks theory and practice*, John Wiley et Sons Ltd, USA,2010.

[17] E. Ermel, A. Fladenmuller, G. Pujolle, A. Cotton, " Estimation de positions dans des réseaux sans-fil hybrides", CFIP, Gennevilliers, France, 2003.

[18] M. Guoqiang, F. Baris, *Localization and strategies for wireless sensor networks*, Information science reference, Hershey New York, USA, 2009.

[19] A. Maali, " Localisation via les signaux ultra wideband (UWB)", Doctorat en science, Ecole Militaire Polytechnique, Alger, 24 octobre 2011.

[20] R. Dalce, " Méthodes de localisation par le signal de communication dans les réseaux de capteurs sans fil en intérieur", Doctorat en informatique et systèmes embarqués, Université De Toulouse (INSA), France, 26 juin 2013.

[21] A. Boukerche, Horacio A. B. F. Oliveira, F. Eduardo.Nakamura, A. Antonio et F. Loureiro, *Localization systems for Wireless Sensor Networks*, Chapitre 11, John Wiley et Sons Inc, 2009.

[22] O.S. Oguejiofor, V.N. Okorogu, Abe .Adewale, B.O. Osuesu, " Outdoor Localization System Using RSSI Measurement of Wireless Sensor Network", IJITEE, ISSN: 2278-3075, Volume-2, Issue-2, Janvier 2013.

[23] E. Cassano, F. Florio, F. De Rango, S. Marano, " A Performance Comparison between ROC-RSSI and Trilateration Localization Techniques for WPAN Sensor Networks in a Real Outdoor testbed", IEEE, 1-4244-2589-1, Université de Calabria, Italie, 2009.

[24] R. Al Alawi, " RSSI Based Location Estimation in Wireless Sensors Networks ", IEEE, 978-1-4577-1826-7, ICON, Department of Electrical and Electronic Engineering, université Bahrain, Bahrain, 2011.

[25] M. Guedmani, " La localisation dans les réseaux de capteurs sans fil (WSNs)**",** Magister en Electronique Université Dr Yahia Farés De Médéa, juin 2012.

[26] K. Benkič, M. Malajner, P. Planinšič, Ž. Čučej, " Using RSSI value for distance estimation in Wireless sensor networks based on ZigBee ", SPaRC Laboratory, Smetanova 17, UM- Maribor Slovenia, 2000.

[27] M. Evangelos.Basilios, " A Real-Time Target Tracking System for Wireless Embedded Nodes using Ranging Measurements", Doctor of Philosophy, Université De Southampton, USA, février 2012.

[28] Ab. Leboukh, M.A. Saidi, " La Localisation dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil : Cas d'un Milieu Fermé", Master en Systèmes de Télécommunications Université Dr Yahia Farés De Médéa, 2013.

[29] H. AYZI, I. Elhasnaoui, " Implantation de capteurs communicants enfouis dans le béton à l'aide de l'outil de développement eZ430-RF2500 de Texas Instruments", Projet initiation à la recherche, Polytech'Lille (USTL), France, 2012.

[30] A. Naren, " Introduction to the Texas Instruments ez430", Rice Université, Houston, Texas USA, 19 juin 2006, Disponible : http://cnx.org/content/col10354/1.6/.

[31] T. Watteyne, " Building Tomorrow's Internet of Things: Latest Standardization Trends and Hands on Programming Tutorial ", WCNC Sydney, Université de California, Berkeley, USA, 18 Avril 2010.

[32] J. Noxon, " AN093 Modifying Radio Register Parameters for SimpliciTI Applications ", Texas Instruments SWRA352, Dallas Texas 75265, USA, 2010.

[33] Texas Instruments, *Chipcon CC2500 : Datasheet*, Dallas Texas, USA, 2006.

[34] M. Claassen," Getting started with SimpliciTI TM and the eZ430 ", Texas Instruments, Dallas Texas, USA, 2008.

[35] Texas Instruments," TI Low Power RF : Designer's Guide to LPRF **",** Dallas Texas 75265, USA, 2010.

[36] L .Doherty, W .Lindsay, J .Simon, " Channel-Specific Wireless Sensor Network Path Data", Dust Networks, IEEE, 1-4244-1251-X, Hayward, CA, USA, 2007.

[37] Y. Kraimia, " Mise en œuvre d'un réseau de senseurs sans l pour la détection d'un incendie", Maitre en Sciences (M. Sc.), Université Laval Québec, Canada, 2012.

[38] M. Van der Haegen, " Réseau de senseurs sans fil : Problèmes de localisation", licence informatique Université libre de Bruxxelles département de l'informatique, Belgique, 2007.

WEBOGRAPHIE

Webographie

[A] : http://www.hilgraeve.com/support/htpe7.exe.

[B] : http://www.straightrunning.com/XmingNotes/.

[C] : http://www.cygwin.com/setup.exe.

[D] : http://www.gtlib.gatech.edu.

Année Universitaire 2013-2014