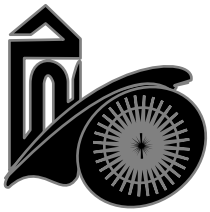
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE Dr YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DU GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE



Mémoire de Magister en Electronique

Option : Instrumentation et Microélectronique

Présenté par : **Mohamed GUEDMANI**

Thème

LA LOCALISATION DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL (WSNs)

Devant le jury :

M. ABUDURA Salam	**Professeur, U.MEDEA**	**Président**
M. GUESSOUM Abderrezak	**Professeur, U.BLIDA**	**Examinateur**
M. BATEL Noureddine	**MCA, U.MEDEA**	**Examinateur**
M. OULD ZMIRLI Mohamed	**MCA, U.MEDEA**	**Directeur de mémoire**

Juin 2012

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu Mr. **Mohamed OULDZMIRLI**, Mon encadreur pour sa sympathie, sa disponibilité, ses idées, ses conseils ainsi que sa prise en charge des dépenses du matériel utilisé et ses encouragements qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

J'adresse aussi mes très sincères remerciements à Mr. **Salam ABUDURA** de me faire l'honneur de s'intéresser à ce travail et d'avoir présidé le jury.

J'exprime ensuite ma plus profonde gratitude à Mr. **Noureddine BATEL** et Mr. **Abderrezak GUESSOUM** qui ont accepté d'examiner ce travail malgré leur emploi du temps surchargé. C'est avec un grand plaisir de voir Mr. **Abderrezak GUESSOUM** examine mon travail qui a été mon enseignant en graduation et en poste graduation.

Je remercie la direction de l'université Docteur « YAHIA FARES » de MEDEA qui ma autoriser de continuer mes études en poste graduation ainsi que la direction du hall de technologie ' **FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE** ' où j'ai réalisé mon projet de magister.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ma mère mes frères et mes sœurs ainsi qu'à ma très chère femme qui ma beaucoup encourager pour continuer mes études sans oublier mes deux filles Nour et Marwa.

Comme je dédie ce travail à toute la famille ADBDERRAHMANE plus spécialement au père de la famille Mr BEN REKAA.

Et je n'oublie pas de rendre hommage à mon très cher père, que Dieu le bénisse l'apaise, qui nous a quitté trop tôt, mais assez tard pour m'avoir transmis tout son amour, son savoir et sa sagesse.

ملخـص

من المحتمل أن تشكل شبكات الاستشعار اللاسلكية في السنوات العشرة المقبلة تطورا تكنولوجيا كبيرا، و ستوفر حلولا للمشاكل الاجتماعية المختلفة المتعلقة بالصحة، الأمن، النقل و التشغيل الآلي للبنايات و ما إلى ذلك، و لقد دخل اليابان بالفعل عصر الشبكات في كل مكان و حتى الجامعة هي الأخرى جد نشطة على حد سواء في هذا المجال.

في غياب المعلومات عن مكان وجود اللاقط (أو الحساس) في شبكة أجهزة الاستشعار اللاسلكية في البيئة التي تنتشر فيها قد تكون البيانات التي يتم جمعها ذات أهمية محدودة.

المشكل المطروح للمعالجة هو تحديد موقع كل لاقط في الشبكة من خلال قياس استطاعة الإشارة المستقبلة (مؤشر استطاعة الإشارة المستقبلة) و بعض اللواقط المعلوم مكان تموقعها.

إن مشكل تحديد موقع اللواقط في شبكة الاستشعار اللاسلكية هو موضوع عدة بحوث علمية حالية و الحلول المقترحة تفرعت حسب نوع مؤشر إشارات الراديو المعتمد عليه في قياس المسافة بين اللواقط (أو الحساسات).

إن معرفة موقع اللاقط (أو الحساس) له دور هام جدا في شبكات الاستشعار اللاسلكية، لأنه يضيف معلومة هامة بالنسبة للبيانات التي تم جمعها. والهدف من هدا المشروع هو إنشاء تطبيق يمكننا من معرفة موقع جهاز الاستشعار الثابت في البيئة المنتشر فيها داخل بناية أو خارجها.

سوف نطبق خوارزمية التثليث و نسعى في مساهمة حل مشكل من مجموع المشاكل المطروحة في مجال شبكات الاستشعار اللاسلكية و هو تحديد موقع اللواقط (أو الحساسات) في بيئات انتشارها.

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil vont sans doute dans les dix années à venir constituer un développement technologique majeur apportant des solutions aux différents problèmes sociétaux liés à la santé, la sécurité, les transports, l'automatisation des bâtiments, etc. Le Japon est déjà entré dans l'ère de ces réseaux ubiquitaires ainsi université et industrie sont à la fois très actives dans ce domaine

En l'absence d'information sur la position des nœuds d'un réseau de capteurs sans fil, au sein de l'environnement où ils sont déployés, les données récoltées peuvent s'avérer d'une utilité limitée.

Le problème traité concerne la localisation de chacun de ces nœuds à partir de mesures de portée inter-capteurs telles que les RSSI et de quelques capteurs dits ancres dont la position est connue.

Le problème de localisation a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, les solutions proposées variant selon le type de mesures de portée inter-capteurs considérées, la nature des hypothèses relatives à la propagation des signaux correspondants, etc.

La Localisation a un rôle très important dans les réseaux de capteurs sans fil, car il ajoute un contexte aux données recueilli. L'objectif de ce travail est de créer une application qui détermine l'emplacement d'un nœud capteur statique dans un environnement intérieur et extérieur.

On applique l'algorithme de triangulation et de multilatération ; on cherche à contribuer à la résolution d'un par mis les problèmes qui se pose dans le domaine des réseaux de capteur sans fil, la localisation des nœuds de capteur dans leur environnements de déploiement.

Abstract

The wireless sensor networks will no doubt within ten years come be a major technological development providing different solutions to societal problems related to health, safety, transportation, building automation, etc… Japan has already entered in the era of ubiquitous networks and both universities and industries are very active in the field.

In the absence of the position information of the nodes in network wireless sensors, within the environment where they are deployed, the collected data may become obsolete.

In this work, we address the problem of localization of each of these nodes from inter-sensor measurements such as RSSI, and a few sensors called anchors whose position is known.

The localization problem has been the subject of much research; proposed solutions vary depending on the type of measures of inter-sensor considered, the nature of the assumptions about the spread of the corresponding signals, etc.

Localization has an import role in wireless sensor networks, as it adds context to gathered data. The goal of this work is to create an application that determines the location of a static sensor node in an indoor and outdoor environment.

We apply the triangulation and multilateration algorithm; we seek to contribute to solving a one of the problems that arise in the field of wireless sensor networks, localization of sensor nodes in their deployment environments.

Liste des figures

Figure 1.1	Les composants d'un capteur sans fil……	05
Figure 1.2	Consommation d'énergie dans un nœud capteur……....	07
Figure 1.3	Architecture d'un réseau de capteurs sans fils……....	08
Figure 1.4	Les différentes normes sans fil……..	13
Figure 1.5	La pile protocolaire……	15
Figure 2.1	Principe des méthodes de localisation par satellite (en 2D)……..	23
Figure 2.2	Exemple de collecte d'informations de voisinage……..	27
Figure 2.3	Registre métrique : La trame RX métrique……	30
Figure 2.4	Une vue du processus de localisation……	33
Figure 2.5	Triangulation en 2 dimensions……..	34
Figure 2.6	Triangulation en 3 dimensions……..	34
Figure 2.7	Cas où l'intersection des trois cercles est un point……	35
Figure 2.8	Cas où l'intersection des trois cercles est une surface……....	36
Figure 2.9	cas (a) où seulement 2 cercles se coupent et cas (b) où les trois cercles se coupent mais pas de manière précise……	36
Figure 2.10	Exemple de carte RSSI obtenue par un nœud sink……..	42
Figure2.11	division en classes de voisinage à un saut afin d'améliorer la précision de localisation…….	44
Figure 3.1	Le kit de développement eZ430-RF2500 de Texas Instruments….....	49
Figure 3.2	Le capteur MSP430-RF2500 de Texas Instruments. ……	49
Figure 3.3	L'environnement IAR……	51
Figure 3.4	Organigramme d'émission et de réception des paquets de donnée par un capteur……...	53
Figure 3.5	la seine d'essai de l'application et test des programmes……..	55
Figure 3.6	capture d'écran de l'environnement CYGWIN…….	55
Figure 3.7	Capture d'écran de la carte relative du réseau WSN……	56

Figure 3.8	capture d'écran de la fenêtre CYGWIN. Collecte des informations du réseau…….	57
Figure 3.9	Environnement laboratoire……	59
Figure 3.10	Environnement couloir……..	59
Figure 3.11	Environnement terrain dégagé……...	59
Figure 3.12	Scénarios « RSSI et distance» dans un laboratoire……	60
Figure 3.13	Scénarios « RSSI et distance» dans un couloir……..	60
Figure 3.14	Scénarios « RSSI et distance» sur un terrain plat et dégagé……..	60
Figure 3.15	Scénarios « RSSI et distance» dans les trois environnements de l'expérimentation……	61
Figure 3.16	Scénarios « RSSI et distance» dans un couloir (l'influence de la direction de l'antenne du capteur sur la puissance reçu)……	61
Figure 3.17	RSSI vs log(d) dans un laboratoire…….	67
Figure 3.18	RSSI vs log(d) dans un couloir……..	67
Figure 3.19	RSSI vs log(d) sur un terrain dégagé…….	67
Figure 3.20	L'évolution de la distance estimée par apport à la distance réelle en fonction du RSSI dans un laboratoire……	70
Figure 3.21	L'écart entre les distances estimées et les distances réelles dans un laboratoire……..	71
Figure 3.22	L'évolution de la distance estimée par apport à la distance réelle en fonction du RSSI dans un couloir…….	71
Figure 3.23	L'écart entre les distances estimées et les distances réelles dans un couloir…….	72
Figure 3.24	L'évolution de la distance estimée par apport à la distance réelle en fonction du RSSI sur un terrain dégagé…….	72
Figure 3.25	L'écart entre les distances estimées et les distances réelles sur un terrain dégagé…….	73
Figure 3.26	Estimation de la position du capteur T(2,2) dans un laboratoire……	78
Figure 3.27	Estimation de la position du capteur W(4,3) dans un laboratoire……..	79
Figure 3.28	Estimation de la position du capteur Z(6,4) dans un laboratoire……	80
Figure 3.29	Estimation des positions des capteurs T, W et Z dans un laboratoire…	80
Figure 3.30	Positions réelles et estimées des capteurs dans un laboratoire……...	81
Figure 3.31	Estimation de la position du capteur T(2,2) dans un couloir……..	82

Figure 3.32 Estimation de la position du capteur W(5,5) dans un couloir…… 83
Figure 3.33 Estimation de la position du capteur W(10,6) dans un couloir…….. 83
Figure 3.34 Estimation des positions des capteurs T, W et Z dans un couloir…….. 84
Figure 3.35 Positions réelles et estimées des capteurs dans un couloir……. 84
Figure 3.36 Estimation de la position du capteur T(5,5) sur un terrain dégagé……. 85
Figure 3.37 Estimation de la position du capteur W(10,5) sur un terrain dégagé…. 86
Figure 3.38 Estimation de la position du capteur Z(5,10) sur un terrain dégagé…. 87
Figure 3.39 Estimation des positions des capteurs T, W et Z sur un terrain dégagé. 87
Figure 3.40 Positions réelles et estimées des capteurs sur un terrain dégagé…… 88

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Tableau comparatif chiffré entre différents protocoles de communication sans fil……	13
Tableau 1.2	Le débit en fonction de la fréquence et de la modulation……	17
Tableau 3.1	Tableau récapitulatif des équations des *RSSI=f (d)* après linéarisation et interpolation……	68
Tableau 3.2	Tableau récapitulatif des équations des distances *d(m) =f (RSSI)*…..…	68
Tableau 3.3	Résultat de localisation du capteur T(2,2) dans un laboratoire……	78
Tableau 3.4	Résultat de localisation du capteur W(4,3) dans un laboratoire……	79
Tableau 3.5	Résultat de localisation du capteur Z(6,4) dans un laboratoire……	79
Tableau 3.6	Résultat de localisation du capteur T(2,2) dans un couloir…….	81
Tableau 3.7	Résultat de localisation du capteur W(5,5) dans un couloir……	82
Tableau 3.8	Résultat de localisation du capteur Z(10,6) dans un couloir……	82
Tableau 3.9	Résultat de localisation du capteur T(5,5) sur un terrain dégagé……	85
Tableau 3.10	Résultat de localisation du capteur W(10,5) sur un terrain dégagé…….	86
Tableau 3.11	Résultat de localisation du capteur Z(5,10) sur un terrain dégagé……..	86
Tableau 3.12	récapitulation des résultats de localisation dans les trois environnements……	88

Table des matières

Introduction générale…….. 01

Chapitre1 : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (WSNs).

1.1 Introduction…….. 04
1.2 Architecture physique d'un capteur sans fil……..... 05
1.3 Architechture d'un reseau de capteurs sans fils……... 07
1.4 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil……. 09
1.5 Les réseaux de capteurs sans fil basée localisation……. 11
1.6 Technologie des réseaux de capteur sans fil……. .. 12
1.7 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil……... . 14
1.7.1 La pile protocolaire……. 14
1.7.2 Les protocoles MAC dans les WSN…….. ……. 16
1.7.3 La méthode d'accès CSMA/CA…….. …….. 16
1.7.4 Couche physique IEEE 802.15.4…… 17
1.7.5 Couche MAC IEEE 802.15.4……. 19
1.8 Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil…….. …… 19
1.9 Problématiques……. 21
1.10 Conclusion…… 21

Chapitre2 : Principes de localisation dans les réseaux de capteurs sans fil (WSNs).

2.1 Introduction……. 22
2.2 Description du Principe de localisation ……..... 23
2.3 Propriétés de localisation dans les WSNs…….. 24
2.4 Estimation des distances…… 26
2.4.1 Estimation des distances à partir des liens de communication……. 26
A Temps d'arrivée (ToA)…….. 27
B Différence des temps d'arrivée (TDoA)…… 28
C Angle d'arrivée (AoA)……... 28

D Indicateur de la qualité du lien (LQI)…… 28
E Puissance du signal (RSSI)……... 29
2.4.2 Calcul des distances manquantes pour la dérivation des Positions…….. 31
A la méthode Sum-dist……. 31
B la méthode Euclidienne……. 32
2.5 Dérivation des positions……..... 32
2.5.1 Localisation d'un capteur par triangulation……. 33
2.5.2 Calcul des coordonnées d'un capteur par Multilatération…… 37
2.6 Les méthodes d'estimation des positions……. 38
2.6.1 Les méthodes libres des ancres……. 38
2.6.2 Les méthodes basées ancres…….. 39
2.6.3 Les méthodes libres de mesures (AT-Free)…….. 39
2.6.4 Les méthodes basées mesures (AT-Dist)…….. 40
2.7 Formes d'implémentation…….. 41
2.7.1 Les méthodes centralisées……. 41
2.7.2 Les méthodes distribuées……. 41
2.8 Le RSSI comme métrique pour la localisation dans les WSNs……. 41
2.9 Conclusion……. 45

Chapitre3 :L'exploitation du RSSI pour la localisation dans les WSNs.

3.1 Introduction……. 47
3.2 Expérimentation…….. 47
3.2.1 Matériel……. 48
3.2.2 Création du projet de réseau de capteurs sans fil (WSN) sous IAR……. 49
3.2.3 Programmation des capteurs…… 51
3.2.4 Technique de récupération des RSSIs……. 54
3.2.5 Environnements et scénarios des expériences……. 58
3.2.6 Résultats des Scénarios « RSSI et distance»……... 59
3.2.7 Interprétation des résultats…… 62
3.2.8 Conclusion 1……. 63
3.3 Recherche d'un modèle type entre le RSSI et la distance…….. 64
3.3.1 Linéarisation et interpolation des valeurs des RSSI mesurés…….. 66

3.3.2 Interprétation……. 68
3.3.3 Conclusion 2……. 69
3.4 Validation du modèle de l'équation du bilan de liaison trouvé d=f (RSSI)…….. 70
3.4.1 L'évolution des distances estimées et réelles en fonction des RSSIs…….. …….. 70
3.4.2 Interprétation des résultats……... 73
3.4.3 Conclusion 3……. 74
3.5 Application du modèle de l'équation trouvé à la localisation dans les WSNs…... 75
3.5.1 L'ordre chronologique de la localisation……. 75
3.5.2 Résultats de la localisation des capteurs dans les trois environnements.. 77
A Résultats de la localisation des capteurs dans un laboratoire……... 78
B Résultats de la localisation des capteurs dans un couloir……. 81
C Résultats de la localisation des capteurs sur un terrain dégagé……. 85
3.5.3 Interprétation des résultats de localisation……... 89
3.6 Conclusion…… 90

Conclusion générale……. 92

Annexes.

Bibliographie.

INTRODUCTION GENERALE

Les capteurs de nouvelles générations se sont dotés de circuits « radio » leur permettant de transmettre et de recevoir de l'information. De plus, ils disposent de capacité de mémorisation et d'une puissance de calcul permettant de réaliser le routage et l'acheminement des paquets d'informations. Ainsi, des réseaux de capteurs sans fil peuvent se former. [BHA 06]

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. On pourra ainsi réaliser des opérations globales, comme éviter une catastrophe, anticiper un problème ou encore optimiser une opération complexe.

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 parmi les principaux problèmes dans ce type de réseaux et nombreuses sont les solutions qui ont été proposées pour le résoudre. En plus il est un parmi les travaux de recherche antérieure dans le domaine des réseaux de capteurs puisque les capteurs peuvent être déployés arbitrairement, leur emplacement doit être connu afin de fournir des données significatives à l'utilisateur.

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

Le but de la localisation dans les WSNs est d'attribuer une position exacte ou estimée à chacun des capteurs du réseau en ce sert de la position de certain nombre d'entre eux s'appellent ancres dont la position est déjà connue.

La localisation dans les réseaux de capteurs se fait en deux étapes, l'estimation des distances et la dérivation des positions des nœuds qui respectent au mieux les distances inter nœuds estimées. [VAN 07]

Le grand problème rencontré dans le domaine de la localisation est dans l'estimation des distances inter capteurs, plusieurs sont les solutions qui ont été proposées pour le résoudre en fonction des capacités des capteurs utilisés. Les capteurs communiquent entre eux et collectent différents indicateurs de qualité des communications radios. Le hardware radio peut rapporter diverses informations sur le signal radio entre deux capteurs à partir desquelles les distances séparant les capteurs peuvent être estimées. Plusieurs sont les technologies de mesure de distance entre deux capteurs à portée radio en fonction des capacités de ces derniers. Parmi ces indications, la perte de puissance du signal entre un capteur émetteur et un capteur récepteur le **RSSI** (Received Signal Strength Indicator) (Indicateur de la puissance du signal à la réception). La perte de puissance entre l'émetteur et le récepteur est proportionnelle à la **distance** parcourue. La mesure **RSSI** propose une estimation de la **distance**.

Notre objectif 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.

La solution proposée est de trouver un modèle mathématique proche de ce lui de l'environnement qui nous fournit la relation entre la puissance reçu par un capteur récepteur (le **RSSI)** et la **distance** qui le sépare d'un capteur émetteur. Ce modèle mathématique sera utilisé

pour estimer les **distances** inter capteurs qui correspondent aux **RSSI** évalués dans l'environnement de déploiement du réseau afin de dériver les positions de ces derniers.

On se base sur l'équation du bilan de liaison entre un émetteur et un récepteur, on fait une série de mesure de l'atténuation de la puissance du signal entre un capteur émetteur et un capteur récepteur à différentes distances et différents environnements pour pouvoir en faire ressortir la formule et voir si on peut valider que la puissance était bien issue d'une formule du type de l'équation du bilan de liaison. Afin d'améliorer la précision de la localisation il faut réaliser un modèle d'atténuation le plus proche de celui de l'environnement dans lequel se trouve les capteurs.

Le problème traité concerne la localisation de chacun de ces nœuds à partir de mesures de portée inter-capteurs telles que les RSSI et de quelques capteurs dits ancres dont la position est connue.

Ce manuscrit est composé de trois chapitres :

- chapitre 1 : Le chapitre 1est consacré aux généralités sur les réseaux de capteurs sans fil et leurs domaines d'applications.

-chapitre 2 : Le chapitre 2 Sera consacré aux principes, techniques et méthodes de localisation dans les réseaux de capteurs sans fil et les technologies de mesure de distance inter capteurs.

-Chapitre 3 : Le chapitre 3 est consacré à la création du projet de réseau de capteurs sans fil (WSN) et au programmation des capteurs utilisés dans les expérimentations qui nous ont permis de faire ressortir le modèle mathématique de l'équation du bilan de liaison qui nous permet d'estimer les distances inter capteurs. Ensuite on applique les algorithmes de dérivation des positions proposés dans ce domaine (triangulation et Multilatération) pour la localisation des capteurs dans différents environnements pour pouvoir voir l'efficacité et la crédibilité du modèle trouvé, on sortant par une borne d'erreur sur les positions.

-Conclusion : notre manuscrit sera finalisé par une conclusion qui englobe les remarques, les perspectives et les problèmes qui nous ont rencontrés au cours du projet.

Chapitre 1

Généralités sur les Réseaux de Capteurs Sans Fil

1.1. Introduction :

Les avancées technologiques et techniques opérées dans le domaine des réseaux sans fil, de la micro fabrication et de l'intégration des microprocesseurs ont fait naître une nouvelle génération de réseaux de capteurs à grande échelle adaptés à une gamme d'applications très variée [BHA 06]. En 1999, est considéré comme « l'une des 21 idées pour le 21ème siècle » et en 2003 on nous annonce que c'est « l'une des 10 nouvelles technologies qui vont bouleverser le monde ». Cette technologie révolutionnaire n'est autre que les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ou plus connue sous le nom de WSN (wireless sensors networks).

UN RCSF (ou WSN) est constitué de dizaines à plusieurs centaines et parfois des milliers de nœuds capteurs. Ces nœuds sont des dispositifs autonomes d'une taille minuscule qui intègrent des unités de calcul et de communication sans fil capables d'accomplir trois tâches complémentaires : capter des informations à partir de l'environnement à contrôler, de les traiter et de les communiquer à un nœud particulier nommé «station de base ». Ce dernier est chargé de collecter les données capturées, et de faire des traitements dessus ou de les retransmettre via un réseau filaire ou via internet.

Les nœuds capteurs sont conçus pour être déployés d'une manière dense dans des endroits hostiles et difficiles à l'accès d'où la nécessité de limiter au maximum leurs dimensions physiques qui s'obtiennent impérativement au détriment des capacités de calcul, de mémoire et de ressources énergétiques. La haute densité de déploiement des nœuds capteurs favorise l'utilisation des communications à multi-sauts (multi-hop) qui consomment moins d'énergie que les communications traditionnelles à un seul saut.

Notons que les réseaux de capteurs font partie de la famille des réseaux ad hoc, c'est à dire des réseaux sans infrastructure ; qu'ils ne disposent d'aucune organisation, chaque nœud du réseau est autonome. Leur structure facilite leur installation et assure leur mobilité. La norme la plus utilisée actuellement pour les réseaux de capteurs sans fil est la norme IEEE802.15.4, mieux connue sous le nom de Zigbee c'est un sous standard de wifi.

Dans ce premier chapitre, nous présenterons un ensemble de généralités sur les capteurs et les réseaux de capteurs sans fil et notamment sur leur architecture, caractéristiques, protocole de communication et domaines d'applications.

1.2. Architecture physique d'un capteur sans fil:

Un capteur est un système de détection, sous forme de signal souvent électrique, d'un phénomène physique. Les capteurs sont des petits appareils dotés d'une batterie, capables de détecter des événements, de calculer, de communiquer entre eux par radio et se déployer aléatoirement. Ils présentent un inconvénient notable, la durée de vie des batteries est limitée.
La figure.1.1 détail la composition de base physique interne d'un élément capteur sans fil car il peut exister des variantes:

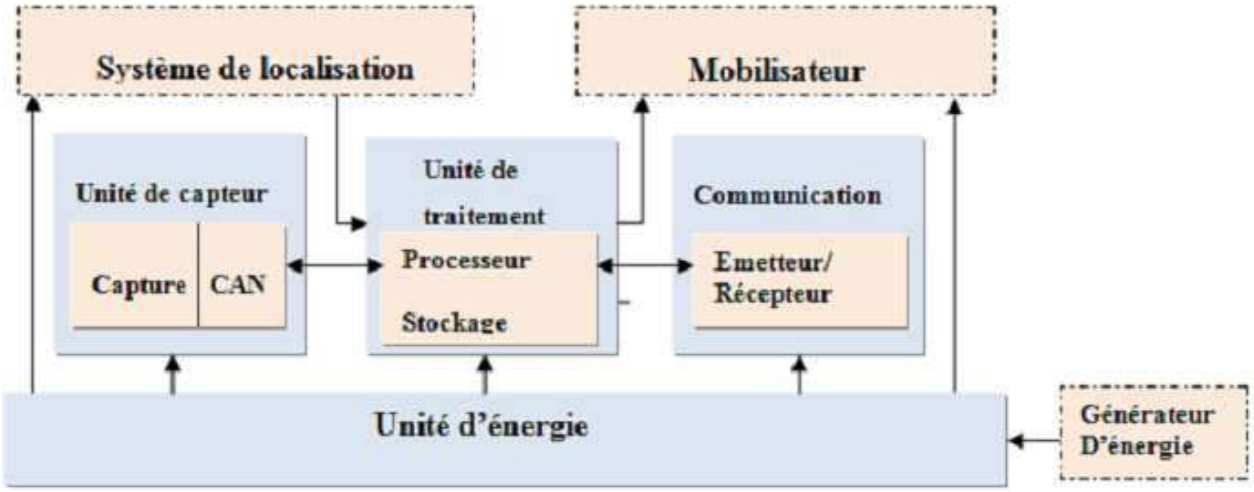


Figure 1.1 : Les composants d'un capteur sans fil. [YAS 07]

Un nœud de capteur est composé de plusieurs éléments ou modules correspondant chacun à une tâche particulière d'acquisition, de traitement, ou de transmission de données. Il comprend également une source d'énergie et des modules optionnels comme un système de localisation et un mobilisateur.

- ***L'unité d'acquisition des données :*** L'unité d'acquisition est composée d'un capteur qui va obtenir des mesures numériques sur les paramètres environnementaux, le principe de fonctionnement des détecteurs est souvent le même : il s'agit de répondre à une variation des conditions d'environnement par une variation de certaines caractéristiques électriques (par exemple pour une thermistance, une variation de température entraîne une variation de la résistance). Les variations de tension sont ensuite converties par un convertisseur Analogique-Numérique afin de pouvoir être traitées par l'unité de traitement. On trouve aussi des structures plus complexes pour détecter d'autres phénomènes : les MEMS (pour Micro electro mechanical systems) [ASSC 02]. Ils sont utilisés pour une grande variété de phénomènes physiques (accélération, concentration chimique...).

- ***L'unité de traitement des données :*** l'unité de traitement est composée de deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de transmission. Cette unité est également composée d'un processeur et d'un système d'exploitation spécifique. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission. Les microcontrôleurs utilisés dans le cadre de réseaux de capteurs sans fil sont à faible consommation d'énergie. Leurs fréquences sont assez faibles, moins de 10 MHz pour une consommation de l'ordre de 1 mW. Une autre caractéristique est la taille de leur mémoire qui est de l'ordre de 10 Ko de RAM pour les données et de 10 Ko de ROM pour les programmes. [HOL05]

  [ASSC 02]. Cette mémoire consomme la majeure partie de l'énergie allouée au microcontrôleur, c'est pour quoi on lui adjoint souvent de la mémoire flash moins coûteuse en énergie. Outre le traitement des données, le micro contrôleur commande également toutes les autres unités notamment le système de transmission et gère les procédures et protocoles permettant la communication entre les nœuds.

- ***L'unité de transmission de données*** **:** l'unité de transmission est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication radio. Le système de transmission consomme environ 20 mW et possède une portée de quelques dizaines de mètres. Pour augmenter ces distances tout en préservant l'énergie, le réseau utilise un routage multi-sauts. Ainsi on retrouve les mêmes problèmes que dans tous les réseaux sans fil : la quantité d'énergie nécessaire à la transmission augmente avec la distance.

- ***La source d'énergie*** **:** La gestion de l'énergie est un point primordial dans les réseaux de capteurs. Tout capteur est muni d'une ressource énergétique à durée de vie limitée, et ce, à cause de la taille réduite de la batterie et l'impossibilité de la recharger ou de la changer. Il est à noter que la gestion de l'énergie est un réel problème pour les réseaux de capteurs, et divers travaux tentent d'y remédier**.** De ce fait, l'unité de contrôle d'énergie est sans doute le composant le plus important du capteur. Elle s'occupe de la répartition de l'énergie au sein du capteur entre les divers modules. Elle permet également quelques fois de réduire la consommation d'énergie en agissant sur les modules inactifs. [DOU06].

La figure (1.2) résume la consommation d'énergie dans les différentes unités d'un capteur.

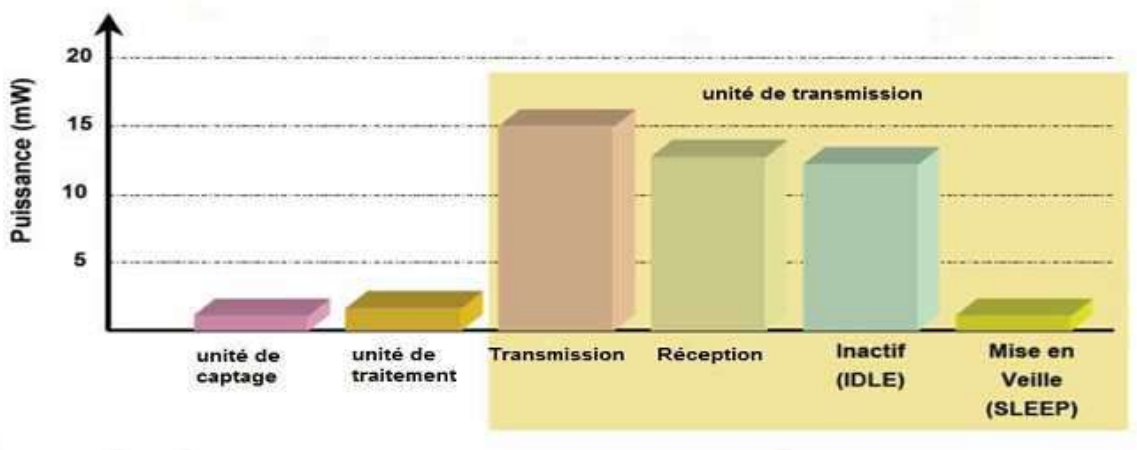


Figure 1.2 : Consommation d'énergie dans un nœud capteur. [BOU 07]

On remarque que l'unité de transmission est très gourmande en consommation d'énergie. En effet la transmission d'un seul bit sur une distance de 100m consomme approximativement la même énergie que l'exécution de 3000 instructions. Toutefois, la mise en veille de la radio réduit de manière significative cette consommation.

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants additionnels : les systèmes de localisation tels que GPS (Global Position System) et un mobilisateur lui permettant le déplacement.

1.3. Architechture d'un réseau de capteurs sans fils :

Les réseaux de capteurs sans fils (ou WSNs) se composent généralement d'un grand nombre de petits dispositifs, qui communiquent entre eux via des liens radio pour le partage d'information et le traitement coopératif. Ces dispositifs sont déployés aléatoirement dans une zone d'intérêt pour superviser ou surveiller des phénomènes divers. Après le déploiement initial, les capteurs peuvent s'auto-organiser en une infrastructure réseau appropriée, souvent en mode multi-sauts. Les données collectées par ces capteurs sont acheminées directement ou via un routage multi-sauts à un nœud considéré comme "point de collecte", appelé station de base. Cette dernière peut être connectée à une machine puissante via internet ou par satellite. En outre, l'usager peut adresser ses requêtes aux capteurs en précisant l'information d'intérêt.

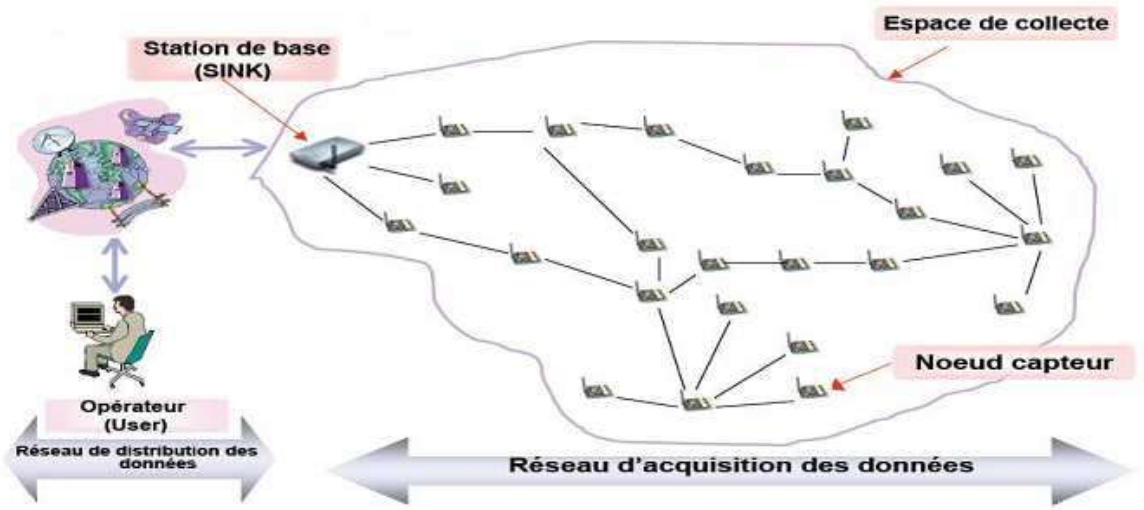


Figure 1.3 : Architecture d'un réseau de capteurs sans fils. [BOU 07]

Un exemple de réseau de capteurs sans fils est fourni en figure (1.3), les capteurs sont déployés de manière aléatoire dans une zone d'intérêt, et une station de base située à l'extrémité de cette zone, est chargée de récupérer les données collectées par les capteurs. Lorsqu'un capteur détecte un événement pertinent, un message d'alerte est envoyé à la station de base par le biais d'une communication multi-sauts. Les données collectées sont traitées et analysées par des machines puissantes.

Un RCSF (WSN) est typiquement constitué d'un champ de captage, plusieurs nœuds capteurs, une station de base et un centre de traitement des données : [YAS 07]

• ***Le champ de captage (espace de collecte) :*** il est considéré comme étant la zone d'intérêt pour le phénomène capté, où les nœuds capteurs y sont placés.

• ***Les nœuds capteurs:*** ce sont le cœur du réseau, leur rôle est de collecter les données et de les router vers la station de base. Leur énergie est souvent limitée puisqu'ils sont alimentés par des batteries.

• ***Le sink (station de base, puits) :*** C'est un nœud particulier chargé d'accueillir, stocker et traiter les données en provenance des autres nœuds et de diffuser les différentes requêtes au réseau. Sa source d'énergie doit être illimitée puisqu'il faut qu'il reste toujours actif pour recevoir les données. Le sink peut être un simple nœud doté d'interfaces réseaux supplémentaires (le plus souvent GPRS ou Ethernet), ou bien une entité extérieure au réseau comme un ordinateur portatif ou un PDA.

• ***Centre de traitement des données (gestionnaire de tâches) :*** Il reçoit les données collectées par le sink, son rôle consiste à les regrouper et les traiter pour en extraire les informations utiles.
Comme le montre la figure (1.3), un RCSF est composé d'un grand nombre de nœuds capteurs éparpillés sur le champ de captage. Quand le sink diffuse une requête, les nœuds collaborent entre eux pour lui envoyer les informations captées à travers une architecture multi-saut. Le puits transmet ensuite ces données par internet ou par satellite au gestionnaire de tâches pour les analyser et prendre des décisions. A un niveau plus élevé un WSN peut être vu comme étant une combinaison de deux entités de réseau:

- ***le réseau d'acquisition des données:*** c'est l'union des nœuds capteurs et du sink. Son rôle consiste à collecter les données à partir de l'environnement et de les rassembler au sink.

- ***le réseau de distribution des données:*** son rôle est de connecter le réseau d'acquisition des données à un utilisateur.

1.4. Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil :

Les principaux caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil se résument en ce qui suit : [XAV 05]

- ***La densité des nœuds :*** Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un nombre très important de nœuds pour garantir une couverture totale de la zone à surveiller. Cette densité peut varier de 0.05 à 1 nœud/m2. Vu le nombre important des nœuds le coût de production d'un capteur doit être faible pour garantir la faisabilité du réseau (généralement < 1$) .

- ***La durée de vie limitée :*** Les nœuds capteurs sont très limités par la contrainte d'énergie, ils fonctionnent généralement sans surveillances dans des régions géographiques éloignées et par conséquent recharger ou remplacer leurs batteries est la plupart du temps impossible.

- ***Communication multi-saut :*** Les ressources physiques limitées des nœuds capteurs leurs imposent des portées de transmission réduite. Ce qui oblige les nœuds à router les informations à travers les autres nœuds pour atteindre le nœud puits. En plus, la haute densité de déploiement des capteurs favorise l'utilisation de cette

communication multi-saut qui consomme moins d'énergie que la communication traditionnelle à un seul saut. [KHE 04]

- ***Ressources limitées :*** Souvent, les nœuds capteurs ont une taille très petite. Ce petit facteur de forme limite la quantité de ressources qui peut être mises dans ces nœuds et par conséquence la capacité de traitement et de mémoire sont très limitées.

- ***Bande passante limitée :*** la bande passante réservée à chacun des nœuds capteurs est modeste en raison du partage du média de communication sans fil entre ces derniers. En conséquent, les nœuds capteurs ne peuvent pas supporter des débits élevés (10 Kbit/s/nœud). [BOU 07]

- ***Aisance de déploiement des nœuds :*** il existe deux moyens de déployer un WSN sur une zone à surveiller. La méthode la plus utilisée est la dissémination aléatoire, par exemple, en projetant des nœuds capteurs depuis un avion ou un bateau. La méthode déterministe, quant à elle, consiste à placer (à la main, par robot,…) les capteurs dans le champ de captage dans des endroits prédéterminés. Mais cette solution devient impensable dès qu'on atteint un nombre élevé de capteurs.

- ***Absence d'adressage unique :*** Dans les réseaux classiques comme : LAN, internet, etc., le routage des paquets est assuré grâce à l'adresse IP du destinataire. Or dans un WSN, on s'intéresse moins à l'auteur d'une donnée qu'à la donnée elle-même. Pour cela il existe deux manières pour référencer un nœud dans un WSN: « basé-attribut » et « basé-localisation ». Ainsi « la température lue par les nœuds de la région A » est un exemple d'adressage basé-localisation et de même « la localisation des nœuds qui ont capté une température supérieure à 70° » est un adressage basé-attribut.

- ***Topologie dynamique :*** L'instabilité de la topologie des RCSFs est le résultat des trois facteurs essentiels suivants:

- La mobilité des nœuds : les nœuds capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent librement et arbitrairement.
- La défaillance des nœuds : la défaillance d'un nœud est très probable à cause des ressources énergétiques limitées des nœuds ou le déploiement de ces derniers dans des environnements hostiles.

- Rajout de nouveaux nœuds : des nœuds peuvent facilement être rajoutés soit pour étendre le réseau ou bien pour compenser la défaillance d'un grand nombre de nœuds après un certain temps de fonctionnement.

- ***Auto-organisation :*** Vu les différentes raisons qui provoquent une topologie instable du réseau de capteurs, ce dernier devra être capable de s'auto-organiser pour continuer ses applications. Cela voudrait dire que chaque nœud doit être capable de localiser ses voisins et établir des routes pour acheminer les paquets au sein du réseau.

- ***Sécurité limitée :*** Les principales caractéristiques des réseaux de capteurs rendent la sécurité très difficile à assurer. En effet, étant basés sur un déploiement dans des environnements hostiles, les réseaux de capteurs sont plus sensibles aux attaques physiques. En plus, la communication sans fil est plus vulnérable que les liaisons filaires. Quiconque possède un récepteur adéquat peut potentiellement écouter ou perturber les messages échangés. Notant que la puissance de calcul limitée des capteurs empêche l'utilisation des mécanismes cryptographiques résistants comme la cryptographie à clé publique [CAS 08].

1.5. Les réseaux de capteurs sans fil basée localisation :

Les protocoles à topologie basée localisation suppose que :

- Le réseau est partitionné en plusieurs zones de localisation.
- Chaque zone a son identifiant.
- Chaque nœud a un identifiant EUI (End-system Unique Identifier) et enregistre dynamiquement l'identifiant de la zone à laquelle il appartient temporairement.

L'information temporaire de localisation appelée LDA (Location Dependent Address) qui est un triplet de coordonnées géographiques (longitude, latitude, altitude) obtenues, par exemple, au moyen d'un GPS avec une précision dépendant du type de l'application. Une telle topologie exige l'implémentation d'un algorithme de gestion de localisation qui permet aux nœuds de déterminer les endroits approximatifs des autres nœuds. Ce type de topologie est mieux adapté aux réseaux avec une forte mobilité.

Avant d'envoyer ses données à un nœud destination, le nœud source utilise un mécanisme pour déterminer la localisation de la destination puis inclus l'identifiant de zone de localisation et du nœud destination dans l'entête du paquet à envoyer [BOU 07].

Dans certains types d'applications les nœuds peuvent être mobiles et la connaissance de la position géographique des nœuds est nécessaire. Cette position peut être calculée par les méthodes de triangulation ou obtenue par un système GPS (Global Positioning System). Une telle architecture est baptisée architecture géographique.

1.6. Technologie des réseaux de capteur sans fil :

Les réseaux de capteurs sans fil font partie des réseaux personnel sans fil WPAN (Wireless Personnel area network) Ils concernent les réseaux sans fil d'une faible portée : de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN tel que le Bluetooth, Infrarouge et la Radio fréquence. Dans les réseaux de capteurs sans fil c'est la technologie radio fréquence qui est la plus utilisée connue sous le nom de Zigbee elle est connue aussi sous le nom de la norme IEEE802.15.4 et permet d'obtenir des liaisons sans fil à bas prix et avec une très faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée pour être directement intégrée dans de petits appareils électroniques (capteurs, appareils électroménagers...). [ZHE 04].

Pour se référer à un mode de communication sans fil plus connu, le Zigbee est fortement inspiré de la technologie Bluetooth, mais en étant moins onéreux et plus simple à implémenter en terme de codage. En effet, les nœuds Zigbee sont en moyenne dix fois plus petits en taille de code. Pour mieux comprendre la place de Zigbee au sein du panel de solution de communication sans fil existant, le graphe en figure (1.4) situe chaque solution selon sa portée et son débit.

Comme on peut le voir, le protocole Zigbee possède une faible portée ainsi qu'un faible débit, mais cela engendre du même coup une faible consommation énergétique. De plus Zigbee possède une fiabilité accrue de part les propriétés du standard IEEE 802.15.4.

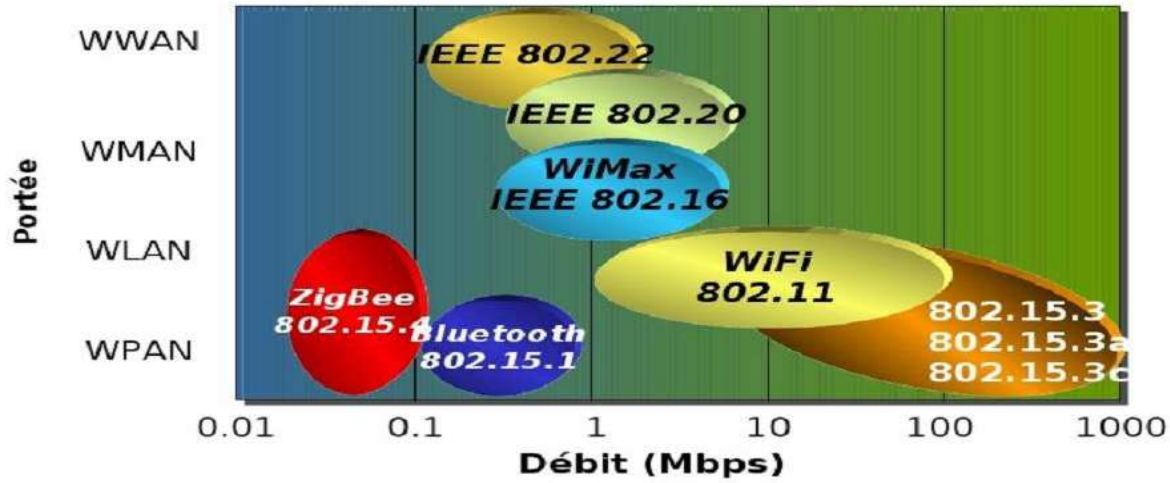


Figure 1.4: Les différentes normes sans fil. [CED 08]

Pour montrer l'intérêt du ZigBee dans son aspect économique du point de vue énergétique, voici un tableau comparatif chiffré entre différents protocoles de communication sans fil.

Tableau 1.1 : Tableau comparatif chiffré entre différents protocoles de communication sans fil. [CED 08]

	ZigBee	GSM/GPRS	Wi Fi	Bluetooth
Ressources systèmes	4 Ko – 32 Ko	+ 16 Mo	+ 1 Mo	+ 250 Ko
Durée de vie de la batterie	100 à + 1000 jours	1 à 7 jours	0,5 à 5 jours	1 à 7 jours
Taille du réseau	Illimité (2^{64})	1	32	7
Bande passante	20 à 250 Ko/s	64 à > 128 Ko/s	> 11000 Ko/s	720 Ko/s
Portée	1 à > 100 mètres	> 1000 mètres	1 à 100 mètres	1 à > 10 mètres

Au vu de ce tableau on comprend qu'on retrouve naturellement ce protocole dans des environnements embarqués où la consommation énergétique est primordiale et où le nombre de membres du réseau est important. On peut citer pour exemple le domaine de la domotique, les applications médicales, les détecteurs de fumée ou encore d'intrusion.

En 2005, une estimation du coût unitaire pour un nœud ZigBee a révélé un prix de 1,10 $ par unité dans le cadre d'une production en très grand nombre. Il faut ajouter le prix du microcontrôleur qui commande le circuit, ce qui augmente légèrement le prix. À titre de comparaison, la

technologie Bluetooth, lancée en 1998, annonçait à cette époque un prix unitaire de production compris entre 4 et 6 $, maintenant redescendu à moins de 3 $.

1.7. Communication dans les réseaux de capteurs sans fil :

Dans le but d'un établissement efficace d'un RCSF, une architecture en couches est adoptée afin d'améliorer la robustesse du réseau. Une pile protocolaire de cinq couches est donc utilisée par les nœuds du réseau. Citons la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données et la couche physique.

De plus, cette pile possède trois plans (niveaux) de gestion, le plan de gestion des tâches qui permet de bien affecter les tâches aux nœuds capteurs, le plan de gestion de mobilité qui permet de garder une image sur la localisation des nœuds pendant la phase de routage et le plan de gestion de l'énergie qui permet de conserver le maximum d'énergie.

1.7.1. La pile protocolaire:

- ***Couche application :***

La couche application constitue l'ensemble des applications implémentées sur un réseau de capteurs. Ces applications doivent fournir des mécanismes permettant à l'utilisateur d'interagir avec le réseau de capteurs à travers différentes interfaces, et éventuellement, par l'intermédiaire d'un réseau étendu (par exemple ; Internet). Elles permettent également de rendre transparents les mécanismes de communication dans les couches inférieures. Tout ceci, en offrant des interfaces pour la création et la diffusion de requêtes [HAM 07].

- ***Couche transport :***

Dans les réseaux de capteurs, la couche transport est essentiellement présente pour constituer une interface entre la couche application et la couche réseau [HAM 07]. Ces principaux objectifs sont:

- Multiplexer et démultiplexer les messages entre les applications et la couche réseau.
- Contrôler les données.
- Réguler la quantité des données injectées dans le réseau.

Les communications dans les réseaux de capteurs étant omnidirectionnelles (communication de nœuds capteurs vers le puits), les protocoles de la couche transport doivent également répondre à cette spécificité.

➢ *Couche réseau :*

Dans les réseaux de capteurs le positionnement des nœuds étant aléatoire et dense, les protocoles de routage traditionnels deviennent inadéquats. Pour cela, la communication multi-sauts est la mieux adaptée.

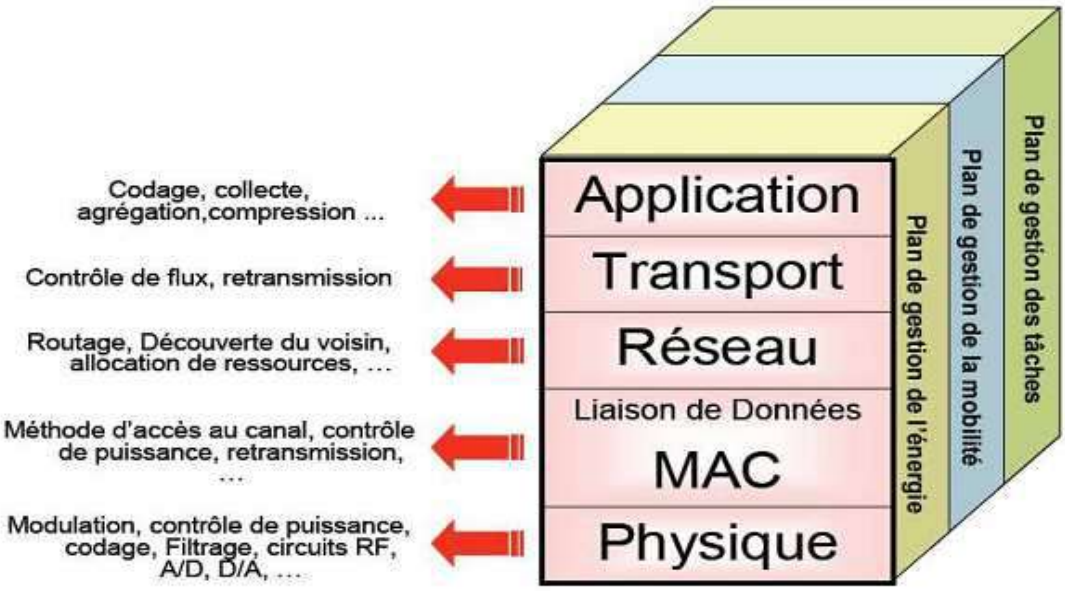


Figure 1.5 : La pile protocolaire. [BOU 07].

➢ *Couche Liaison de données :*

La couche liaison de données est principalement responsable de :

- Multiplexer le flux de données.
- Détecter et verrouiller les trames de données.
- Contrôler l'accès au support de transmission (Media Access Control).
- Assurer une connexion fiable (point-à-point ou point-à-multipoints) selon la topologie du réseau de capteurs.
- Contrôler les erreurs.

➢ *Couche physique:*

La couche physique est responsable du support acheminant les données communiquées entre les nœuds [HAM 07]. Ainsi, il existe deux types de médias pouvant être utilisés pour les réseaux de capteurs : les infrarouges et les radiofréquences [ABO 05]. Ainsi, il est possible de résumer les tâches accomplies au niveau de la couche physique en quatre points :

- La sélection des fréquences.
- La génération des ondes porteuses.
- La détection du signal.
- La modulation.

Quant aux niveaux intégrés dans la pile protocolaire, le niveau de gestion d'énergie adopte quelques mécanismes pour contrôler l'énergie consommée par les capteurs. Ainsi, un nœud-capteur met son récepteur en veille après la réception d'un message. Il informe également ses voisins de son incapacité à participer au routage lorsqu'il atteint un seuil critique d'énergie.
Le niveau de gestion des tâches équilibre la distribution des tâches de captage sur les différents nœuds concernés afin d'optimiser la consommation d'énergie. En effet, la nature des capteurs ou leur niveau d'énergie implique que les nœuds peuvent avoir des rythmes différents de travail.

1.7.2. Les protocoles MAC dans les WSN :

Un protocole MAC pour les réseaux de capteurs sans fil doit trouver le bon compromis entre l'économie d'énergie, l'aspect temps réel et l'auto configuration. [CHA 09] présente quelques protocoles 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 et les protocoles hybrides. Il décrit aussi en résumé quelques protocoles MAC représentatifs de chacun de ces types. A noter que ces protocoles sont les plus étudiés dans la littérature et non pas forcement les plus performants, il s'agit de protocoles de base et parfois sujets à optimisation.

1.7.3. 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 un réseau local Ethernet classique, la méthode d'accès utilisée par les machines est le CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*), pour lequel chaque machine est libre de communiquer à n'importe quel moment. Chaque machine envoyant un message vérifie qu'aucun autre message n'a été envoyé en même temps par une autre machine. Si c'est le cas, les deux machines patientent pendant un temps aléatoire avant de recommencer à émettre.

Dans un environnement sans fil ce procédé n'est pas possible dans la mesure où deux stations communiquant avec un récepteur ne s'entendent pas forcément mutuellement en raison de leur rayon de portée. Ainsi la norme 802.11 propose un protocole similaire appelé CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*).

Le protocole CSMA/CA utilise un mécanisme d'esquive de collision basé sur un principe d'accusé de réception réciproque entre l'émetteur et le récepteur. La station voulant émettre écoute le réseau. Si le réseau est encombré, la transmission est différée. Dans le cas contraire, si le média est libre pendant un temps donné (appelé DIFS pour *Distributed Inter Frame Space*), alors la station peut émettre. La station transmet un message appelé Ready To Send (ou *Request To Send*, noté RTS signifiant prêt à émettre) contenant des informations sur le volume des données qu'elle souhaite émettre et sa vitesse de transmission. Le récepteur (généralement un point d'accès) répond un *Clear To Send* (CTS, signifiant *Le champ est libre pour émettre*), puis la station commence l'émission des données. [CHA 09]

À la réception de toutes les données émises par la station, le récepteur envoie un accusé de réception (ACK). Toutes les stations avoisinantes patientent alors pendant un temps qu'elles considèrent être celui nécessaire à la transmission du volume d'information à émettre à la vitesse annoncée. En **annexe** vous trouvez un organigramme qui traduit l'algorithme de la méthode d'accès au réseau CSMA/CA. [CHA 09]

1.7.4. Couche physique IEEE 802.15.4:

La couche physique IEEE 802.15.4 est généralement prise en charge par le module radio. Elle offre quatre débits différents. Le tableau 1.2 résume les débits proposés selon la fréquence et la modulation. [CHA 09]

Tableau 1.2 : Le débit en fonction de la fréquence et de la modulation.

Fréquence (MHz)	Modulation	Débits (Kb/s)
868/868,6	BPSK	20
868/868,6	ASK	250
868/868,6	O-QPSK	100
902/928	BPSK	40
902/928	ASK	250
902/928	O-QPSK	250
2400/2483,5	O-QPSK	250

Dans la bande de fréquences des 2.4 GHz, le débit est donc de 250 K b/s , il lui est associe un seuil de réception qui va jusqu'à –92 dBm .Avec les trois plages de fréquences , la couche physique

offre 27 canaux de transmission déférents dont 16 sur la plage de fréquences de 2400/2483.5 MHz séparés de 5 MHz , 10 sur la plage de fréquences de 902/928 séparés de 2 MHz et 1 canal sur la plage de fréquences de 868/868.6 MHz . L'usage de ces canaux dépend de la législation des pays dans les quels des solutions conformes à ce standard sont utilisées.

Parmi les fonctionnalités de contrôle de cette couche, nous pouvons disposer de celles qui permettent de :

– activer et désactiver le module radio,

– remonter l'état d'un lien à la couche supérieure,

– tester l'occupation du canal en faisant un CCA,

– choisir le canal de transmission.

On détaille ces fonctions de contrôle de cette couche qui nous permis par la suite de sortir par un algorithme d'émission et de réception entre deux capteurs.

➢ *Activation et désactivation du module radio :*

Le module radio possède trois états de fonctionnement : un état de transmission, un état de réception et un état de sommeil. Le temps de changement d'état entre transmission et réception ne doit pas dépasser les 192 µs. Cet état est piloté par la couche MAC. Il est essentiel pour économiser de l'énergie de mettre le module en mode sommeil.

➢ *Indication de la qualité du lien :*

Le LQI (Link Quality Indication) caractérise la qualité d'un lien à un instant donné suite à une réception d'une trame. Ce paramètre est essentiel pour les protocoles des couches réseau et application. Par exemple, un protocole de routage peut exploiter cette indication afin d'identifier les meilleurs liens à utiliser dans son choix de routes.

➢ *Test d'occupation du médium ou CCA (Clear Channel Assessment):*

Le CCA permet de savoir l'état du canal radio. Il est essentiel pour le fonctionnement de l'algorithme de CSMA/CA [CHA 09] de la couche MAC. La couche physique est capable d'effectuer trois modes de CCA différents :

– La détection d'un signal avec une puissance reçue supérieure à un certain seuil.

– La détection d'un signal conforme à la modulation de la couche physique.

– L a détection d'un signal qui répond aux deux conditions.

A noter que le seuil de détection d'activité est typiquement -95 dBm

- ***Sélection du canal :***

Comme la couche physique offre plusieurs canaux de transmission, il est nécessaire de sélectionner un canal précis, ceci à la demande des couches supérieures. Le changement de canal est aussi fait implicitement par la couche physique suite à une demande de scrutation sur l'ensemble des plages de fréquences chacune constituant un canal de transmission. Cette action est appelée un scan.

1.7.5. Couche MAC IEEE 802.15.4:

Les fonctionnalités de gestion essentielles de la couche MAC 802.15.4 sont : l'accès au médium, les scans, la création du réseau et l'association, la synchronisation avec un coordinateur et les échanges de trame, la gestion des tables de routage, la configuration de la topologie et l'allocation des adresses.

1.8. Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil :

La miniaturisation, l'adaptabilité, le faible coût et la communication sans fil permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications. Ils permettent aussi d'étendre le domaine des applications existantes. Parmi ces domaines où ces réseaux se révèlent très utiles et peuvent offrir de meilleures contributions, on peut noter le militaire, la santé, l'environnemental, et les maisons intelligentes.... [LEH 09]

- ***Applications militaires :***

Le faible coût, le déploiement rapide, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes sont des caractéristiques qui ont rendu les réseaux de capteurs efficaces pour les applications militaires. Plusieurs projets ont été lancés pour aider les unités militaires dans un champ de bataille et protéger les villes contre des attaques, telles que les menaces terroristes.

- ***Applications environnementales:***

Le contrôle des paramètres environnementaux par les réseaux de capteurs peut donner naissance à plusieurs applications. Par exemple, le déploiement des thermo-capteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu et par suite faciliter la lutte contre les feux de forêt avant leur propagation. Le déploiement des capteurs chimiques dans les milieux urbains peut aider à détecter la pollution et analyser la qualité d'air. De même leur déploiement dans les sites industriels

empêche les risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.).

- ***Applications médicales :***

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (surveillance de la glycémie, détection de cancers, ..). Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient. D'autre part, ces réseaux peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri, ...) chez les personnes dépendantes (handicapées ou âgées).

- ***Applications domiciliaires :***

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les magnétoscopes, ... Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance.

- ***Applications commerciales :***

Il est possible d'intégrer des nœuds capteurs au processus de stockage et de livraison de marchandise. Le réseau ainsi formé, pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison.

- ***Application à la 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.…

1.9. Problématiques :

Pour réaliser des systèmes capables de fournir de telles applications, un certain nombre d'obstacles doivent être levés. Les plus importants sont : [PAR 05]

- déploiement ad hoc, par exemple lors d'un largage de capteurs par avion sur une forêt pour la surveiller.
- opération sans maintenance, qui nécessite une configuration automatique.
- source d'énergie finie, et donc limitation maximale des communications.
- adaptation dynamique, en particulier lors de l'arrivée ou la chute de capteurs, ou en cas de modification des stimuli.
- routage, pour obtenir une consommation énergétique minimale.
- localisation dans un référentiel par rapport aux autres nœuds ou de manière absolue.

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

1.10. Conclusion :

Dans toutes les applications citées, un événement détecté par un capteur n'est utile que si une information relative à sa localisation géographique est fournie ; sans cette information, ces applications n'auraient aucun sens. Il s'agit donc de déterminer pour chacun des capteurs sa position. Les problématiques de localisation, en particulier, sont particulièrement importantes, dans la mesure où ces capteurs sont dans un environnement évolutif, et où ils peuvent être eux même amenés à modifier leur position, de manière autonome ou non.

De nos jours, il y a une réelle demande de localisation automatique : une firme, comme DHL veut savoir où sont ses colis, le livreur veut trouver son chemin, le chef pompier veut savoir où sont ses hommes, les parents veulent savoir où sont leurs enfants . . .

Pour toutes ces raisons et d'autres nous nous intéressant à la résolution du problème de la localisation dans les WSNs et le chapitre suivant sera consacré aux principes et techniques de la localisation des capteurs sans fils dans leurs environnements de déploiement.

Chapitre 2

Principe de localisation dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (WSNs)

2.1. Introduction:

Le but de la localisation dans les WSNs est d'attribuer une position exacte ou estimée à chacun des capteurs du réseau on ce sert de la position de certain nombre d'entre eux s'appellent ancres dont la position est déjà connue.

Les systèmes de localisation existants sont nombreux et utilisent plusieurs voies technologiques, ils sont très différents les uns des autres et répondent en général à des besoins différents (Localisation dans une pièce ou à l'échelle de la planète, localisation précise ou imprécise, localisation d'un seul ou plusieurs objets, localisation statique ou suivi de cible, ...).

Un système de localisation existe déjà, qui est disponible sur toute la surface du globe : le GPS (Global positionning system). Pourtant, il n'est pas satisfaisant pour l'usage nécessaire, car il cumule les handicaps. Il est disponible seulement en extérieur, et encore si aucun obstacle ne vient obstruer les champs de vue des récepteurs, le fonctionnement sous un feuillage dense ou dans des villes aux rues étroites, n'est pas possible, où seulement dans de très mauvaises conditions. De plus il est particulièrement coûteux, tant en ce qui concerne le matériel qui est dupliqué en nombreux exemplaires dans un réseau à forte densité de capteurs. De plus, la réception du signal est très gourmande en énergie, ce qui n'est pas compatible avec les problématiques de gestion de durée de vie des batteries. [CLE 08]

Les deux modules optionnels, qui composent l'architecture d'un capteur présentée dans le chapitre 1 figure1.1, s'avèrent très utiles pour résoudre le problème de la localisation. En effet, ils apportent des informations pertinentes comme la position exacte de certains nœuds pour le module de localisation ou bien des données relatives aux distances ou aux angles pour le module de mesure. Le module optionnel de localisation est également une source de consommation d'énergie non négligeable. Pour prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs, il est donc indispensable de minimiser les calculs et les communications. Ces contraintes majeures doivent être prises en compte par les méthodes proposées pour ce type de réseau. La localisation par moyens propres est donc indispensable.

Ce chapitre présente le contexte dans lequel s'inscrit le problème de la localisation dans les réseaux de capteurs. Il propose un descriptif du principe de localisation par satellite avant de s'intéresser aux techniques qui permettent aux capteurs de mesurer les distances qu'ils forment avec leurs voisins. Enfin, il fait un rappel des principales méthodes qui ont été proposées pour résoudre le problème de la localisation.

2.2. Description du Principe de localisation dans les WSNs:

La méthode de localisation des capteurs dans les WSNs est essais de celle du GPS (Global Positioning System) qui est le système de localisation américain.

Le principe général de ces technologies, illustré en figure 2.1, se décrit comme suit. Des satellites dédiés gravitent autour de la terre. Lorsqu'un module de localisation demande sa position, chaque satellite lui communique ses coordonnées et la distance qui le sépare de lui (cette distance est mesurée via la technologie ToA expliquée ci-après). [CLE 08]

Au moins trois satellites sont nécessaires pour une localisation dans la deuxième dimension, alors qu'au moins quatre le sont pour la troisième. Le module applique alors la multilatération. En deux dimensions, il s'agira de définir le point d'intersection des trois cercles dont les centres sont les positions des satellites et les rayons sont les distances entre le module et les satellites (comme illustré en figure 2.1). En trois dimensions, les cercles sont remplacés par des sphères dont le point d'intersection correspond à la position du module. [CLE 08]

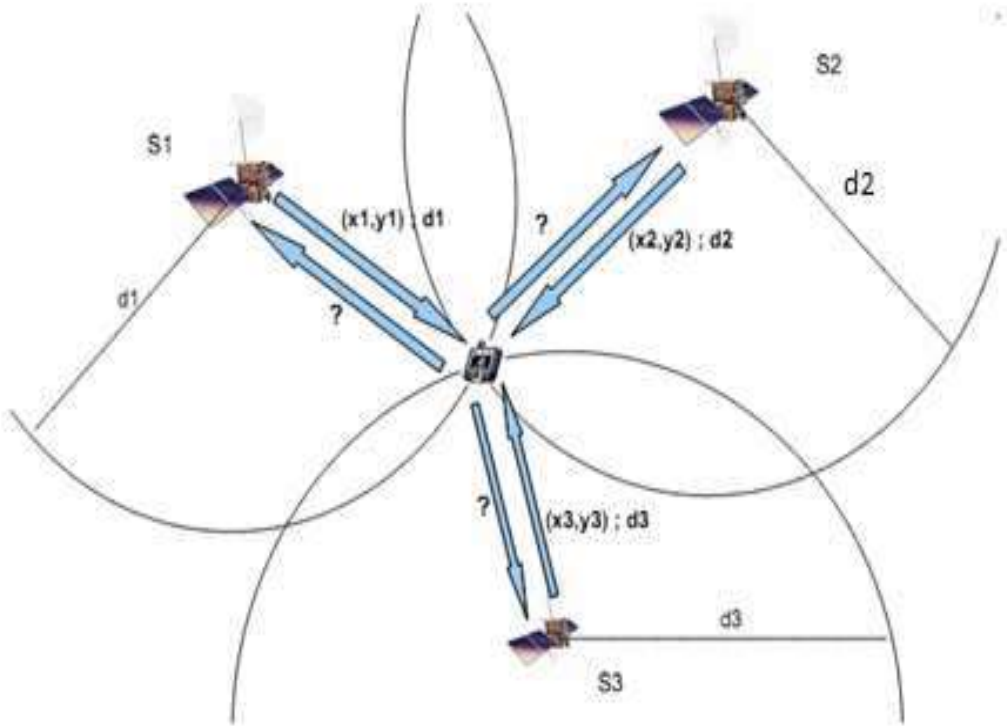


Figure 2.1 : Principe des méthodes de localisation par satellite (en 2D). [CLE 08]

2.3. Propriétés de localisation dans les WSNs :

La localisation peut être définie comme la position d'un objet ou d'une personne dans un repère. Un système de localisation doit avoir les propriétés suivantes :

1 - Une technique d'estimation de position,

2 - Un repère qui permet d'obtenir des positions et qui les organise de façon cohérente.

3 - 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.

4 - 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.

5 - Un cout - matériel, infrastructure, ...

Notation :

Cette section a pour but d'introduire la notation utilisée pour le problème de la localisation dans un réseau de capteur communiquant entre eux. [VAN 07]

Soit N le nombre de nœuds déployés dans un certain environnement et $m \geq 0$ le nombre de nœuds appelés ancres et étiquetés : 1, . . ., m dont la position est connue à priori.

L'objectif de la procédure de localisation est de trouver la position de $n > 0$ nœuds cibles étiquetés : $m + 1, \ldots, N$ et donc $N = n + m$.

On représente la position réelle de nœud i dans un espace euclidien de dimension p par un vecteur dans IR^p : $xi = (x_{i1}, \ldots, x_{ip})$ $1 \leq i \leq N$. p est en général égal à 2 ou 3.

Nous définissons X ancres = $[x_i]$, $1 \leq i \leq m$, pouvant être représenté par une matrice de taille $p \times m$ qui est connue au début.

Le but de localisation est de trouver $X_{cibles} = [x_j]$, $m + 1 \leq j \leq N$, pouvant être représenté par une matrice de taille $p \times n$.

Soit $\hat{x}_j$ notre estimation de x_j. Le problème revient à minimiser la fonction d'optimisation suivante :

$$J_1(\hat{x}) = \sum_{m+1 \le i \le N} \sqrt{(\hat{x}_i - X_i)^2} \quad (2.1)$$

Pour estimer ces positions nous utilisons la communication dans le réseau afin d'estimer les distances entre les nœuds.

Soit $d_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{p}(x_{ik} - x_{jk})^2}$ la distance euclidienne entre 2 nœuds i et j. Et soit $\hat{d}_{ij}$ notre estimation de d_{ij} .

On peut maintenant reformuler cela comme un autre problème d'optimisation où il faut minimiser la fonction suivante :

$$J_2(x) = \sum_{m+1 \le i,j \le N} (\hat{d}_{ij} - \|\hat{x}_i - \hat{x}_j\|)^2 \quad (2.2)$$

Comme nous nous plaçons dans le cas d'une localisation statique, on considère que deux nœuds i, j peuvent communiquer ensemble s'ils ont pu communiquer suffisamment longtemps pour permettre d'estimer la distance les séparant.

Pour quantifier la précision des différentes méthodes, nous utilisons la RMSE (Root Mean Square Error, en français : racine de l'erreur quadratique moyenne).

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

$$E_{RMSE}^{dist} = \sqrt{\frac{\sum_{i,j \in (1,N)} (\hat{d}_{ij} - d_{ij})^2}{N}} \quad (2.3)$$

Pour rappel : N est le nombre de nœuds dans le réseau,

Soit xi la position du nœud i obtenue par une certaine méthode de localisation A. L'estimation de l'erreur de localisation est donnée par :

$$E_{RMSE}^{pos} = \sqrt{\sum_{i=1}^{(N-m)} \frac{(\hat{x}_i - X_i)^2}{(N-m)}} \quad (2.4)$$

La méthode utilisée dans la localisation des capteurs se fait en deux étapes : l'estimation des distances aux autres nœuds, ensuite la dérivation des positions par triangulation et multilatération.

2.4. Estimation des distances:

Dans cette phase les capteurs communiquent entre eux et collectent différents indicateurs de qualité des communications radios. Le hardware radio peut rapporter diverses informations sur le signal radio entre deux nœuds.

En effet le simple fait qu'ils communiquent entre eux nous indique qu'ils sont à portée radio l'un de l'autre. De plus le hardware radio des capteurs peut nous rapporter diverses caractéristiques à propos du signal radio entre les deux nœuds, à partir desquelles les distances séparant les nœuds peuvent être estimées. L'estimation se fait en fonction des propriétés du signal. Le temps de propagation, l'atténuation ou la forme sont évaluées au niveau du nœud pour déduire cette distance [VAN 07].

L'estimation des distances se fait de la manière suivante : [VAN 07]

- Estimation des distances à partir des liens de communications.

- Calcul des distances manquantes.

Un exemple intuitif d'estimation des distances est donné en figure 2.2

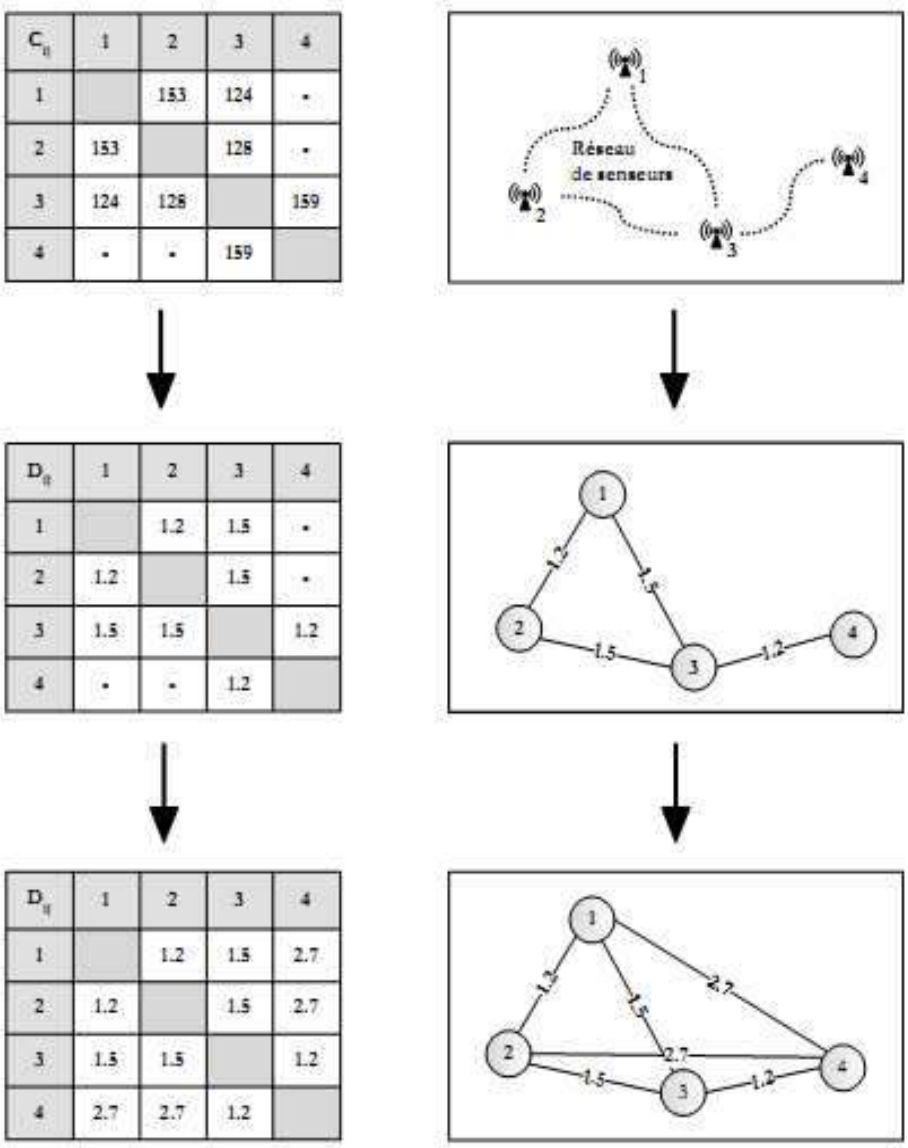
1. Les valeurs C_{ij} de l'indicateur pour les liens de communication sont collectées.
2. Ces valeurs sont transformées en distances D_{ij}.
3. Les distances manquantes sont complétées.

2.4.1. Estimation des distances à partir des liens de communication :

L'estimation de distance peut se faire sur base de différents indicateurs. De manière générale, si c_{ij} est la valeur de l'indicateur entre les nœuds i et j et si la fonction f nous permet de déduire une estimation de la distance entre i et j (que nous notons $\hat{d}_{ij}$), nous avons donc :

$$\hat{d}_{ij} = f(c_{ij})$$

Selon la nature de l'indicateur, cette fonction f peut ne pas être connue à priori.



C_{ij}	1	2	3	4
1		153	124	-
2	153		128	-
3	124	128		159
4	-	-	159	

D_{ij}	1	2	3	4
1		1.2	1.5	-
2	1.2		1.5	-
3	1.5	1.5		1.2
4	-	-	1.2	

D_{ij}	1	2	3	4
1		1.2	1.5	2.7
2	1.2		1.5	2.7
3	1.5	1.5		1.2
4	2.7	2.7	1.2	

La figure 2.2 : Exemple de collecte d'informations de voisinage. [VAN 07]

Plusieurs technologies permettent à un capteur de mesurer la distance qui le sépare d'un capteur voisin (ToA, TDoA, LQI, RSSI) ou bien de mesurer l'angle qu'il forme avec celui-ci (AoA).

A. Temps d'arrivée (ToA):

La technologie ToA (Time of Arrival) suppose que les nœuds du réseau sont synchrones. La distance qui sépare deux capteurs se déduit de la vitesse de propagation du signal et de la différence entre les dates d'émission et de réception du message. Cette technologie est celle utilisée par le système GPS (Global Positioning System) [CLE 08]. Lorsque les nœuds ne sont pas synchrones,

l'envoi d'un message aller -retour est nécessaire. En fonction de son horloge, de la vitesse de propagation du signal et du temps de traitement du signal reçu, un capteur récepteur obtient la distance qui le sépare du capteur émetteur en calculant la différence entre les dates d'émission et de réception, en y soustrayant le temps de traitement du signal, puis en divisant le résultat par deux on suppose que les nœuds du réseau ont un temps de traitement du signal identique. [CLE 08]

B. Différence des temps d'arrivée (TDoA):

La technologie TDoA (Time Difference of Arrival) [CLE 08] se base sur la différence des dates d'arrivée d'un ou plusieurs signaux et suppose également que la vitesse de propagation des signaux est connue. Cette technologie s'applique dans les cas suivants :

– un émetteur envoie des signaux de natures différentes (par exemple l'ultrason, l'onde radio, ...) à un récepteur.

– un récepteur reçoit des signaux d'une même nature d'au moins trois émetteurs ;

– un émetteur envoie un signal reçu par au moins trois récepteurs (dans ce dernier cas une vue globale des signaux sera connue).

Dans chacun des cas, les récepteurs mettent en corrélation leurs informations et en déduisent les distances qui les séparent des émetteurs. Il s'agit d'une simple résolution d'un système d'équations dont les distances sont les inconnues.

C. Angle d'arrivée (AoA):

La technologie AoA (Angle of Arrival) [CLE 08] calcule l'angle formé entre deux capteurs. Chaque capteur est doté d'antennes orientées de sorte à déduire l'angle qu'il forme avec un voisin lorsque ce dernier lui envoie un signal. Cet angle est reporté par rapport à un axe propre au capteur. Toutefois, un capteur peut être équipé d'une boussole et, dans ce cas, l'angle sera reporté sur un des axes nord, sud, est ou ouest.

D. Indicateur de la qualité du lien (LQI) :

Selon la norme 802.15.4 (zigbee), le LQI (Link Quality Indicator) est une indication de la puissance et/ou de la qualité d'un paquet reçu. Dans la radio, cette valeur fournit une indication sur le taux d'erreurs à la réception d'un message. Il s'agit de la moyenne des erreurs sur les 8 premiers symboles reçus après le SFD (Start of Frame Delimiter) une séquence de bits qui indique le début d'un message. La valeur est comprise entre 50 et 110. Une valeur de 110 correspondants à une

transmission sans erreur et une valeur de 50 à un taux critique d'erreurs (proche de la corruption et du rejet du paquet). L'utilisation de cette mesure dans les couches réseau et application n'a pas encore été spécifiée dans le Standard IEEE-802.15.4.

La mesure du LQI doit être effectuée pour chaque paquet reçu, et le résultat doit être signalé à la couche MAC comme un entier allant d e 0 à 255. Le minimum et le maximum des valeurs du LQI (0 et 255) devraient être associés à la plus basse et la plus haute qualité des signaux détectables par le récepteur.

Les valeurs LQI doivent être uniformément réparties entre ces deux limites et dépend vraiment du type de récepteur utilisé, notamment celui du module radio CC2500 où ces deux limites sont en fait 50 et 110.

Les capteurs ne connaissent pas la position géographique exacte des autres nœuds. La détermination du nœud le plus proche et le plus éloigné dépend de l'indicateur de la qualité du lien. Pour chaque paquet reçu cette valeur est retournée par le module radio. Plus la valeur est grande, meilleure est la qualité du lien entre les deux nœuds dont il est question. Par conséquent, dans ces capteurs, si le LQI entre deux nœuds est au-dessus d'un seuil donné, ils peuvent communiquer directement, en tenant compte de l'ensemble de la topologie du réseau.

Un nœud calcule la qualité de ses liens avec ses trois meilleurs voisins et construit ainsi sa table de voisinage en tenant compte également du nombre de sauts (**distance**) vers la Station de Base. Le choix du prochain saut (voisin) dépend de l'estimation du coût du lien afin d'atteindre la Station de Base. [KAC 09]

E. Puissance du signal : RSSI (Received Signal Strength Indicator)

La puissance d'émission et de réception d'un signal peut être également exploitée pour obtenir la distance entre deux capteurs. La technologie RSSI (Received Signal Strength Indicator) 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 (resp. proches), plus la perte est importante (resp. faible). Cette perte sera alors traduite en une distance. La perte de puissance entre l'émetteur et le récepteur est proportionnelle à la distance parcourue. La mesure RSSI propose une estimation de la distance mais pas de son axe directeur. La mesure du RSSI est une valeur arbitraire, elle dépend de la manière dont le constructeur de l'équipement la implémentée. La méthode de

calcul de ce paramètre est donc à prendre en considération afin de connaitre la valeur de l'information retournée par l'équipement. [CLE 08]

Le RSSI est un indicateur de la puissance de signal au moment de la réception d'un message, pour la radio CC2500 du capteur utilisé dans nos expériences Le RSSI est une valeur numérique sur 8 bits stockée dans un registre du hardware de la radio. La valeur du RSSI est toujours moyennée sur 8 périodes de temps (∼128µs).

RSSI (1B)	CRC (1b)	LQI (1b)

Figure 2.3 : Registre métrique : La trame RX métrique. [THO 10]

La puissance du signal radio peut être calculée par la formule de calibration suivante: [VAN 07]

$$P = R\,S\,S\,I_{value} + R\,S\,S\,I_{off\ set}\ (dBm) \qquad (2.5)$$

Où l'offset est une correction trouvée empiriquement lors de la conception du hardware. Elle est estimée dans [TEX 06] à approximativement −45 dBm.

Un modèle très répandu existe pour représenter le RSSI en fonction de la distance : le modèle log normal shadowing [VAN 07] :

$$RSSI(d)=P_T\text{-}PL(d_0)\text{-}10\eta\log_{10}\frac{d}{d0} +X_\sigma \qquad (2.6)$$

Où P_T est la puissance de transmission, P L (d_0) est la perte de signal pour une distance de référence d_0 et η est l'exposant de la perte de signal. η dépend du milieu de propagation

$2 \leq \eta \leq 6$. η =2 (valeur de l'indice η dans l'atmosphère et un milieu sans obstacle).

Les variations aléatoires dans les RSSI sont exprimées comme une variable aléatoire gaussienne de moyenne 0 et de variance σ^2 : $X_\sigma \sim N(0, \sigma^2)$. Toutes les puissances sont données en dBm et toutes les distances en mètres.

Un modèle mathématique de l'atténuation du signal est souvent ressorti de l'équation du bilan de liaison: [YAN 08] Ce bilan tient compte de la puissance fournie, du gain des antennes, de la distance et des pertes.

$$Prssi = \left(\frac{\lambda}{4*\pi*r}\right)^n GeGrPe \qquad (2.7)$$

$Prssi$: Valeur du RSSI mesurée (en watt).
λ : longueur d'onde.
G_e : gain de l'antenne émettrice.
G_r : gain de l'antenne réceptrice.
P_e : puissance d'émission.
r : distance entre émetteur et récepteur.
n : l'indice ou l'exposant de la perte de signal de propagation, dépond du milieu et de l'atmosphère $2 \leq n \leq 6$ (valeur de l'indice n dans l'atmosphère n=2).

Alors :

$$Prssi = \left(\frac{\lambda}{4 * \pi * r}\right)^2 GeGrPe$$

On constate qu'il s'agit d'un modèle en $\frac{1}{r^2}$ et donc plus les capteurs sont éloignés, moins la mesure sera précise. *Prssi* dépendait bien de l'inverse de la distance au carré.

2.4.2. Calcul des distances manquantes pour la dérivation des positions :

En général les distances déduites des liens de communication ne sont pas suffisantes pour la deuxième partie qui consiste à dériver les positions des capteurs. Pour calculer les distances manquantes, il existe plusieurs possibilités:

A. la méthode Sum-dist :

Si 2 nœuds a et b ne peuvent pas communiquer entre eux mais peuvent tous les deux communiquer avec un nœud c intermédiaire, nous pouvons déduire la distance entre a et b par $d_{ab} = d_{ac} + d_{cb}$. Cette méthode ne donne néanmoins pas toujours de bons résultats, surtout dans des réseaux ou la topologie est très irrégulière. Elle a le mérite d'être simple et peu coûteuse. On peut l'appliquer sur un réseau, qui serait représenté par un graphe, en utilisant un algorithme de fermeture transitive de graphe [LAN 03].

B. la méthode Euclidienne:

[NIC 03] a proposé une autre méthode appelée Euclidienne qui est basée sur la géométrie locale des nœuds autour d'une ancre. C'est une méthode géométrique qui utilise les propriétés des angles dans les triangles pour estimer les distances manquantes.

Les ancres commencent par diffuser leurs positions et les capteurs estiment les distances qui les séparent de ces ancres.

Cette technique calcule, sous certaines conditions, une distance exacte lorsqu'un capteur connaît deux voisins ayant estimé leurs distances avec une ancre.

2.5. Dérivation des positions :

Le but de cette phase est de trouver les positions des capteurs qui respectent au mieux les distances inter nœuds estimées.

Si nous connaissons la position de quelques nœuds (capteurs ancres) du réseau dans un certain système de coordonnées, les positions des autres nœuds dans ce système de coordonnées peuvent être trouvées et seront par la suite eux-mêmes des ancres qui peuvent contribuer dans l'estimation des positions d'autres capteurs dans le réseau. Les méthodes de dérivation des positions des capteurs dans un réseau sont nombreuses et variées, les plus utilisées seront détaillées par la suite.

Notons que divers raffinements peuvent être appliqués, par exemple : Les distances estimées entre les nœuds peuvent être raffinées en refaisant communiquer les nœuds. De la même façon, on peut affiner la position des nœuds et appliquer diverses vérifications sur leurs positions. Une dernière transformation des positions de nœuds peut être réalisée afin de les intégrer dans une carte existante. [VAN 07]

On peut voir un schéma de la localisation dans les WSNs sur la Figure 2.4. Cette figure représente le processus de localisation dans les réseaux de capteurs de la façon la plus générale possible.

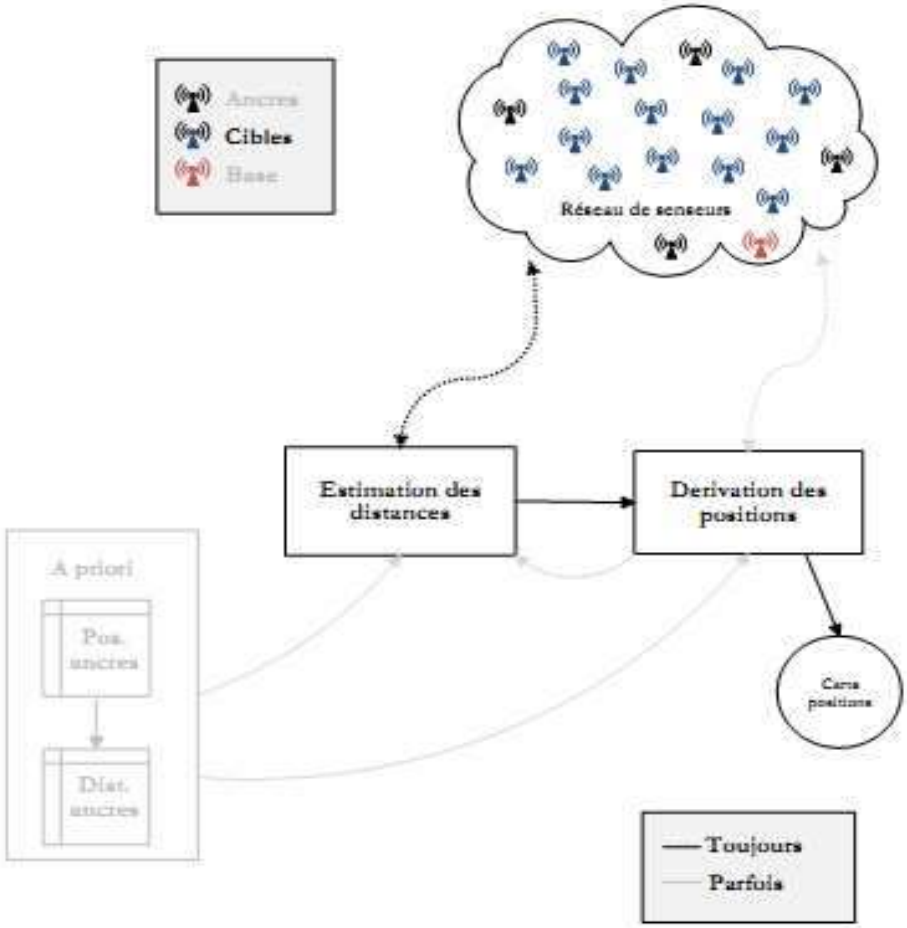


Figure 2.4 : Une vue du processus de localisation. [VAN 07]

2.5.1. Localisation d'un capteur par triangulation:

Les figures 2.5 et 2.6 illustrent la triangulation en deux dimensions et trois dimensions respectivement. Pour la triangulation 2D, la connaissance de trois nœuds est indispensable : avec un nœud, on estime la distance par rapport au point connu on a donc une infinité de positions possibles. Avec deux nœuds connus, on limite cette incertitude à deux points. Avec trois nœuds, on parvient à estimer la position exacte. [PAR 05]

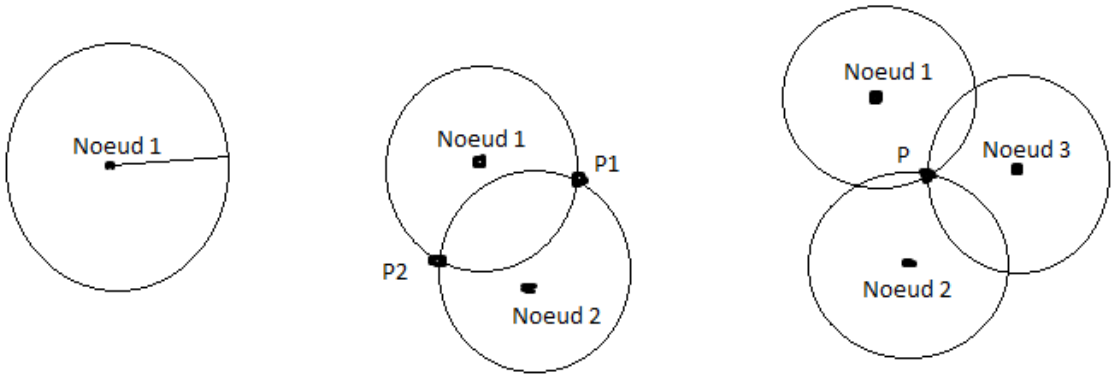


Figure 2.5: Triangulation en 2 dimensions.

La situation réelle met naturellement en œuvre trois dimensions. La connaissance d'un nœud donne donc comme position possible l'ensemble des points sur la sphère de centre ce nœud. La connaissance d'un deuxième nœud réduit l'incertitude à un cercle. Avec trois nœuds, on a deux points, et avec quatre nœuds, un seul point. Dans la pratique, on utilise un cinquième point, afin de réduire au maximum l'incertitude.

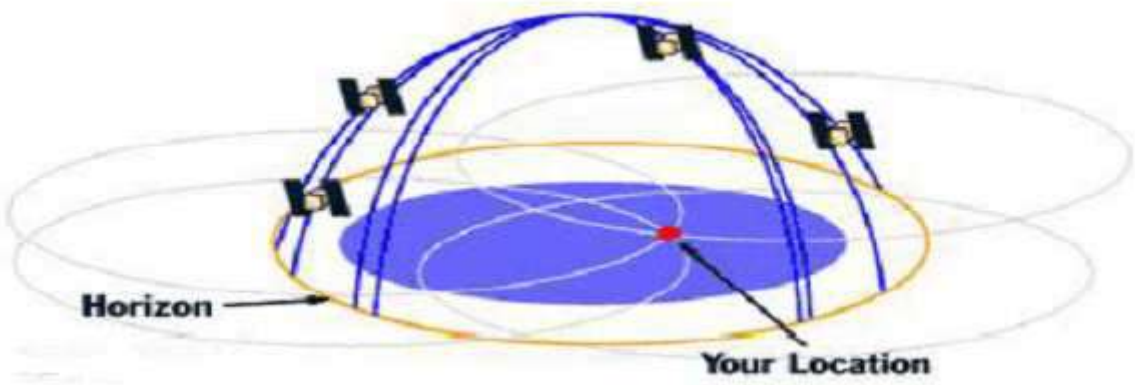


Figure 2.6: Triangulation en 3 dimensions. [PAR 05]

L'idée principale dans la localisation des capteurs est d'avoir une base de 3 capteurs dont on connaît les positions, ces derniers s'appellent ancres et vont agir comme base du repère et il suffit que les capteurs dont nous voulons connaître la position se contentent d'émettre un message simple pour que les capteurs de la base puissent repérer à quelle distance ils se situent.

Nous expliquons ici le principe de triangulation, qui permet de connaître la position d'un capteur dans le réseau, en connaissant les coordonnées de 3 autres capteurs ancres et les distances qui le séparent de chacun d'eux.

Soient trois capteurs ancres a, b et c et un capteur cible I. Les trois cercles A, B et C tracés sur la figure 2.7 sont les cercles de centre un capteur ancre et de rayon la distance que le sépare du capteur I qu'on veut estimer sa position. Le point d'intersection des trois cercles est la position du capteur I.

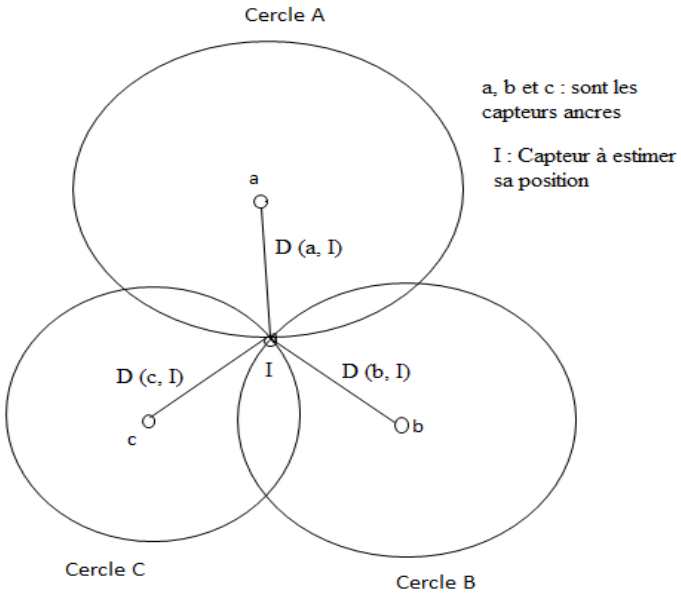


Figure 2.7 : Cas où l'intersection des trois cercles est un point.

Puisqu'en pratique la distance calculée par les capteurs ne sera jamais exacte (c'est une distance estimée), il est impossible de tomber sur le cas de la figure 2.7 et de résoudre simplement le système pour trouver les coordonnées du point d'intersection I.

En pratique, la solution est la suivante :

1. On calcule les deux points d'intersection de deux cercles s'ils existent.
2. On choisit le point le plus près du troisième cercle.
3. On fait cela pour les 3 cercles de façon à obtenir 1, 2 ou 3 points.
4. On calcule le barycentre des 1, 2 et 3 points trouvés qu'on valide comme les coordonnées du capteur cible I.

La position estimée du capteur I est le barycentre de l'intersection des 3 cercles.

On suppose qu'il est impossible de n'obtenir aucun point d'intersection, ce là voudrait dire que la technologie est à un point mauvaise, qu'elle ne pourrait être que cassé. [CED 08]

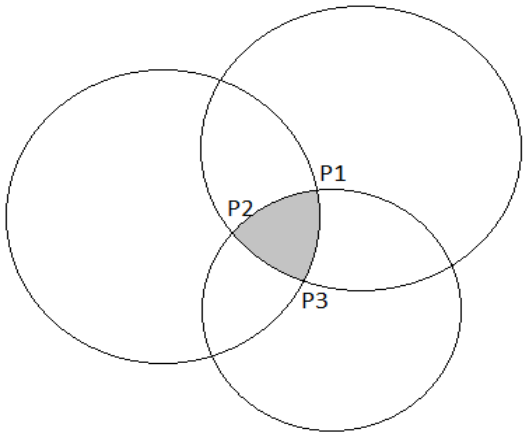
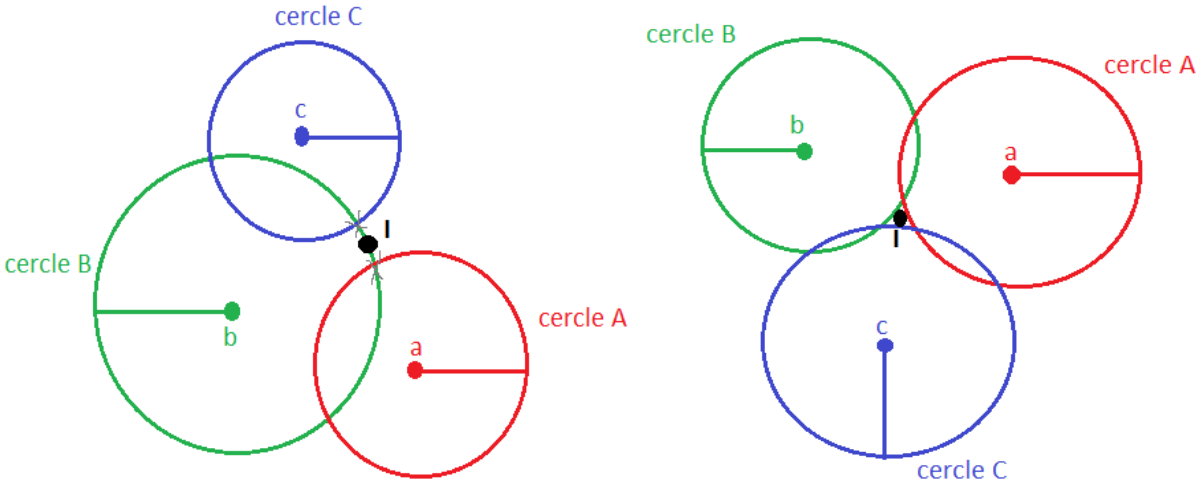


Figure 2.8 : Cas où l'intersection des trois cercles est une surface

Cas particulier:



- a - **- b -**

Figure 2.9 : cas (a) où seulement 2 cercles se coupent et cas (b) où les trois cercles se coupent mais pas de manière précise.

2.5.2. Calcul des coordonnées d'un capteur par Multilatération :

La multilatération nous permet de trouver les coordonnées d'un nœud à partir des coordonnées d'un certain nombre d'ancres et des distances qui le sépare de ces derniers. [VAN 07]

Soit une cible a dont on veut trouver la position $\hat{x}_a$, et soit m ancres i dont nous connaissons les positions $xi \in IR^p$, $1 \leq i \leq m$. (IR^p un espace euclidien à p dimensions.)

Nous supposons que nous connaissons aussi une estimation des distances $\hat{d}_{ia}$, $1 \leq i \leq m$ entre chaque ancre i et le nœuds a.

Nous pouvons alors poser :

$$\begin{aligned}
&(x_{11} - x_{a1})^2 + (x_{12} - x_{a2})^2 + \ldots + (x_{1p} - x_{ap})\,2 = \hat{d}^2_{1a} \\
&\vdots \\
&(x_{m1} - x_{a1})^2 + (x_{m2} - x_{a2})^2 + \ldots + (x_{1p} - x_{ap})^2 = \hat{\hat{d}}^2_{ma}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Le système peut être linéarisé en soustrayant la dernière équation des m −1 équations précédentes.

$$\begin{aligned}
&x^2_{11} - x^2_{m1} - 2(x_{11} - x_{m1})\, x_{a1} + x^2_{12} - x^2_{m2} - 2(x_{12} - x_{m2})\, x_{a2} + \ldots. + x^2_{1\,p} - x^2_{mp} - 2(x_{1\,p} - x_{mp})\, x_{ap} = \hat{d}^2_{1\,a} - \hat{d}^2_{ma} \\
&\vdots \\
&\vdots \\
&x^2_{(m-1)\,1} - x^2_{m1} - 2(x_{(m-1)\,1} - x_{m1})x_{a1} + x^2_{(m-1)\,2} - x2_{m2} - 2(x_{(m-1)\,2} - x_{m2})x_{a2} + \ldots + x^2_{(m-1)\,p} - x^2_{mp} - 2(x_{(m-1)\,p} - x_{mp})x_{ap} = \hat{d}^{\,2}_{(m-1)\,a} - \hat{d}^{\,2}_{ma}
\end{aligned} \tag{2.9}$$

En réordonnant les termes, nous obtenons un système d'équations linéaires de la forme

Ax = b où :

$$A=\begin{bmatrix} 2(x_{11}-x_{m1}) & \cdots & 2(x_{1p}-x_{mp}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 2(x_{(m-1)1}-x_{m1}) & \cdots & 2(x_{(m-1)p}-x_{mp}) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$b=\begin{bmatrix} x^2{}_{11}-x^2{}_{m1}+ & \cdots & +x^2{}_{1p}-x^2{}_{mp}+\hat{d}^2{}_{ma}-\hat{d}^2{}_{1a} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x^2{}_{(m-1)1}-x^2{}_{m1}+ & \cdots & +x^2{}_{(m-1)p}-x^2{}_{mp}+\hat{d}^2{}_{ma}-\hat{d}^2{}_{(m-1)a} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Comme nous avons des erreurs dans les estimations de distances, nous ne pouvons pas trouver de solution exacte à ce système d'équations. La solution la plus proche (au sens des moindres carrés) de la solution exacte est obtenue en minimisant $(Ax-b)^T*(Ax-b)$.

Et donc $\hat{x}_a = \text{argmin}\,(Ax-b)^T*(Ax-b) = (A^T*A)^{-1}*A^T*b$.

Où $\hat{x}_a = [x_{a1}, x_{a2}, \ldots, x_{ap}]$

C'est-à-dire notre estimation de la position du nœud a.

Le processus peut être recommencé avec tous les nœuds inconnus du réseau. Nous obtenons ainsi les positions de tous les nœuds dans le réseau.

2.6. Les méthodes d'estimation des positions :

Les méthodes d'estimation des positions des capteurs proposés par [CLE 08] sont nombreux et varies on présente ici la définition de quelques méthodes. Il est très intéressant de les découvrir même si dans la pratique il est impossible de tenir compte de tous ces méthodes lors d'une estimation de localisation. Néanmoins, il peut être intéressant de les garder à l'esprit afin de pouvoir rendre une méthode choisie meilleure selon telle ou telle méthode.

2.6.1. Les méthodes libres des ancres:

Sont celles qui n'ont besoin de la position d'aucun nœuds ancre pour fonctionner ; elles créent donc une carte relative du réseau. Par relative, nous entendons une carte qui est à une translation, une rotation orthogonale, une réflexion et une dilatation près de la' vraie' carte. Autrement dit, c'est une carte qui conserve les rapports entre les distances entre tous les points. Ces

méthodes construisent un système de coordonnées « virtuelles » (différent du système terrestre). Elles ne nécessitent pas de module de localisation et attribuent aux capteurs des positions (coordonnées virtuelles) dans ce système. Ces méthodes ne sont pas utilisées pour la localisation dans le sens géographique du terme, mais plutôt pour l'identification ou l'adressage des capteurs. Ces positions sont alors utilisées dans des domaines tels que le routage. [CLE 08]

2.6.2. Les méthodes basées ancres:

Sont celles qui ne fonctionnent pas sans connaître la position d'un certain nombre d'ancres à priori. [VAN 07]

Si une méthode requiert l'encodage au préalable de la position d'un certain nombre d'ancres, cela signifie qu'il faudra qu'une personne intervienne avant un déploiement pour mesurer la position d'un certain nombre de nœuds. Cela est parfois difficile, voire impossible dans certaines situations.

Et donc, le fait que la méthode de localisation requiert ou non de connaître la position d'un certain nombre d'ancres est une caractéristique importante de la méthode. Parmi les méthodes basées ancres les méthodes libres de mesure et celles basées mesure, sont deux algorithmes de localisation par approximation. Leur but est de permettre aux capteurs de trouver leur position à l'aide des positions connues de seulement quelques capteurs spécifiques appelés « ancres ».

L'utilisation d'une technique plutôt que d'une autre dépendra des caractéristiques des capteurs. Par exemple, pour la technique utilisant la puissance du signal (RSSI), il faut que les capteurs soient équipés du module de traitement RSSI.

2.6.3. Les méthodes libres de mesure: ou (AT-Free)

AT –Free (technique d'approximation libre mesure de distance). [CLE 08]. Ces méthodes ne calculent jamais de distances entre voisins. Elles utilisent d'autres informations telles que la connectivité pour identifier la position des nœuds. Dans cette famille de méthodes, les capteurs cherchant à déterminer leurs positions s'appuient uniquement sur les positions des ancres. En fonction de ces positions, chaque capteur définit une zone géographique le contenant et prend pour position le centre de gravité de celle-ci. Chaque nœud peut savoir si sa position estimée est proche de sa position réelle et, le cas échéant, devient une ancre estimée afin d'aider à son tour les autres nœuds à se localiser. Par conséquent, ces méthodes ne peuvent fournir que des positions estimées aux capteurs.

Au départ, chaque ancre diffuse sa position. Un nœud peut donc en déduire le nombre de sauts qui le sépare de chacune des ancres (seul le plus petit nombre de sauts est retenu). A la réception de la position d'une ancre, un nœud considère les cas suivants:

– s'il reçoit la position directement de l'ancre, il en déduit qu'ils sont voisins et donc qu'il appartient au disque centré en l'ancre de rayon r.

– s'il reçoit la position par un nœud intermédiaire, il en déduit qu'il n'est pas voisin de l'ancre et donc qu'il n'appartient pas au disque de rayon r centré en l'ancre. En revanche, il appartient au disque centré en l'ancre de rayon $r_x h$, où h représente le nombre de sauts entre le nœud et l'ancre.

La conjonction de toutes ces informations pour chacune des ancres définit une zone contenant le nœud dont la position estimée est calculée comme étant le centre de gravité de cette zone.

Remarque : Pour avoir un résultat cohérent on a besoin de recevoir les informations d'au moins 2 ancres. Cette méthode semble donner de bons résultats dans les réseaux denses et réguliers. [CLE 08]

2.6.4. Les méthodes basées mesure :(AT-Dist)

AT- Dist (Technique d'approximation basée mesure de distance) [CLE 08]. Le principe général reste le même que celui de la méthode libre de mesure. Le changement concerne l'estimation de la distance séparant un nœud et une ancre distante. Précédemment, cette distance était estimée comme étant le produit du rayon d'émission r et du nombre de sauts h entre le nœud et l'ancre. Cette dernière utilise la technique d'estimation des distances.

Les méthodes basées mesures utilisent les technologies ToA, RSSI, AoA afin de mesurer les distances ou les angles entre deux capteurs voisins. Grâce à cette capacité de mesure, un capteur pourra, sous certaines conditions, obtenir sa position exacte. Autrement, une position estimée lui sera attribuée. Les méthodes basées mesures sont les plus répandues. La connaissance des distances entre nœuds voisins fournit des informations considérables pour la localisation. Cette méthode suppose que les capteurs ont la capacité de mesurer les distances avec leurs voisins et grâce à cette capacité, cette méthode améliore la technique d'approximation des positions et définit des règles permettant de localiser exactement certains nœuds. [CLE 08]. Ensuite en fait la somme des distances entre les nœuds séparant un capteur d'une ancre. Les distances ainsi estimées sont notées

d̂. Ces méthodes estiment les distances entre les nœuds et ensuite dérivent de ces distances les positions des nœuds.

2.7. Formes d'implémentation:

Nous distinguons plusieurs façons d'implémenter le processus de localisation :

2.7.1. Les méthodes centralisées:

Tous les nœuds communiquent avec leurs voisins et renvoient à l'ordinateur central soit des informations sur le signal, soit directement les distances car il ya des capteurs qui sont dotés de systèmes de mesure de distance mais ces derniers sont chères et consomme beaucoup d'énergie. L'ordinateur central s'occupe si nécessaire d'estimer les distances à partir des informations sur le signal et ensuite de localiser les nœuds. [HEI 00], [BUL 02].

2.7.2. Les méthodes distribuées:

Ici tous les nœuds communiquent avec leurs voisins pour estimer les distances et échangent leurs informations de voisinage. Ils dérivent ensuite de façon distribuée la position de tous les nœuds dans le réseau. C'est-à-dire qu'à la fin du processus de localisation, chaque nœuds doit connaître sa position ainsi que celles de ses voisins et ce sans l'aide d'un ordinateur central qui effectuerait les calculs. Pour les grands réseaux, on considère qu'une méthode distribuée est nécessaire car les méthodes centralisées demanderaient trop de communication pour l'acheminement des informations vers l'unité centrale et consommeraient donc trop d'énergie. [PRI 03]

2.8. Le RSSI comme métrique pour la localisation dans les WSNs :(Etat de l'art).

La mesure du RSSI peut être effectuée 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. Et effectivement, l'indicateur de puissance du signal reçu (RSSI) est pris par de nombreux articles comme mesure pour estimer la position ([BAH 00], [KRI 04], [SUG 06], [NEA 03]).

[BAH 00] et [KRI 04] se basent sur une carte de la puissance du signal reçu sur la zone de déploiement. Cette carte doit être obtenue préalablement par des mesures ou par un ensemble de capteurs dédiés (*sniffer*) dont l'emplacement est connu. Par exemple, la figure 2.10 montre une carte de mesures de RSSI obtenue par un *sniffer*. Chaque entité, à la fois non ancre et non *sniffer*, va mesurer la puissance du signal reçu de chaque ancre et fournir un vecteur qui va correspondre à une sorte d'« empreinte » RSSI. Un point central va comparer cette empreinte avec la carte des RSSI de la zone et ainsi déterminer, par exploration, la position de l'entité.

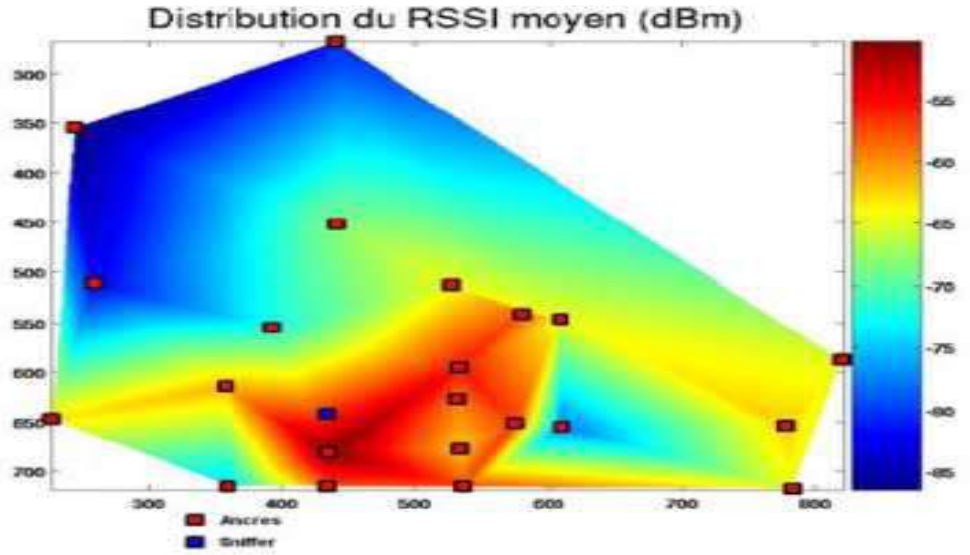


Figure 2.10 : Exemple de carte RSSI obtenue par un nœud sink.

À l'aide de simulations et d'une expérimentation, [SUG 06] propose de localiser un nœud *cible* grâce à plusieurs nœuds fixes connaissant leur position. En calculant l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE) des mesures effectuées, un nœud central est capable d'estimer la position du nœud *cible*. L'expérimentation donne cependant des erreurs de positionnement significatives au regard de la taille de la zone de déploiement.

[NEA 03] utilise la notion de proximité (la capacité d'un nœud à envoyer un message correctement à un nœud voisin) pour améliorer la précision de la localisation. Cependant, il est nécessaire d'avoir une correspondance entre le RSS et la portée. De plus, l'expérimentation reste limitée à de très courtes distances (0,25m), sans interférence extérieure.

L'ensemble de ces études va buter sur la difficulté d'établir un rapport entre la distance et la puissance du signal reçu.

[HAS 93] montre que la puissance du signal reçu va être affectée par trois phénomènes, l'affaiblissement de propagation (ou *path-loss*), l'évanouissement (ou *fading*) et les« zones d'ombre » (ou *shadowing*) :

- L'affaiblissement de propagation se caractérise par la dispersion de la puissance d'une onde électromagnétique lorsqu'elle parcourt une distance d. Cet affaiblissement est généralement considéré comme proportionnel à d^n avec d la distance entre le récepteur et le transmetteur et n est l'indice de propagation (*Path Loss Exponent*) compris entre 1 et 6 selon les modèles. Par exemple, dans le cas d'un environnement sans obstacle, n sera égal à 2. C'est cette propriété que les auteurs utilisant le RSS comme mesure de la distance veulent exploiter.

- l'évanouissement se caractérise par la déviation ou l'atténuation de l'amplitude et de l'énergie du signal à travers le médium qu'il traverse. Ce phénomène va varier en fonction du temps, de la position géographique et de la fréquence radio utilisée. La présence de réflecteurs dans l'environnement entre le récepteur et le transmetteur crée la possibilité de trajets multiples que le signal peut emprunter. Cela a pour conséquence la superposition de plusieurs copies du même signal émis, chacun ayant emprunté un trajet différent. La somme de ces signaux reçus peut atténuer, amplifier, ou bruiter le signal original. Dans le cas d'une mesure de RSS, comme l'évanouissement est dépendant de la fréquence, [NEA 03] propose de mesurer le RSS sur plusieurs fréquences espacées et d'établir une moyenne en fréquence.

- Les zones d'ombre est la perte de signal due à des obstacles (murs, vitres, immeubles, arbres, voitures, personnes, etc.) entre le transmetteur et le receveur. Alors que le *shadowing* induit par les murs ou les bâtiments ne va pas évoluer temporellement, [WAL 98], en étudiant le niveau d'un signal d'une fréquence de 2, 4GHz, montre que les mouvements de personnes vont créer des zones d'ombre important (jusqu'à $-21dB$ d'écart avec la moyenne) et de façon imprédictible. Une solution possible sera alors de moyenner assez longtemps pour« lisser » ces variations.

Le retour d'expérience des auteurs dans le déploiement de réseaux de capteurs permet également de savoir que les conditions météorologiques telles que la pluie ou le brouillard peuvent dégrader considérablement la puissance du signal reçu.

Pour [RAM 09] cependant, la variation du RSSI n'est pas due au multi trajet mais principalement aux interférences extérieures (radio, objets mobiles, etc.). Il constate que, malgré un

environnement particulièrement favorable (pas d'interférences en radiofréquences externes), des «caprices» matériels ou la mobilité d'objets à l'intérieur du réseau fera varier le RSSI de manière imprédictible.

Pour palier à ces difficultés, [XIA 05] propose non pas d'établir une correspondance directe entre distance et RSSI mais un classement parmi le 1-voisinage direct de chaque nœud en fonction du RSSI. Il se sert ensuite de ce classement pour améliorer des techniques de localisation par ancre [SHA 03]. Ces techniques considèrent le saut comme unité de mesure, le classement des voisins en s classes va permettre de diviser un saut en s subdivisions et améliorer la précision (voir figure 2.11). Même si cette division en classe des voisins permettrait d'éviter les petites fluctuations du RSSI, cette proposition est encore dépendante du RSSI très instable sur une courte période de temps. De plus, l'étude ne se démarque pas de l'hypothèse d'une distance strictement proportionnelle au RSSI. Il n'existe donc pas, à notre connaissance, d'expérimentations dans un environnement réel qui ait montré une stabilité du RSSI.

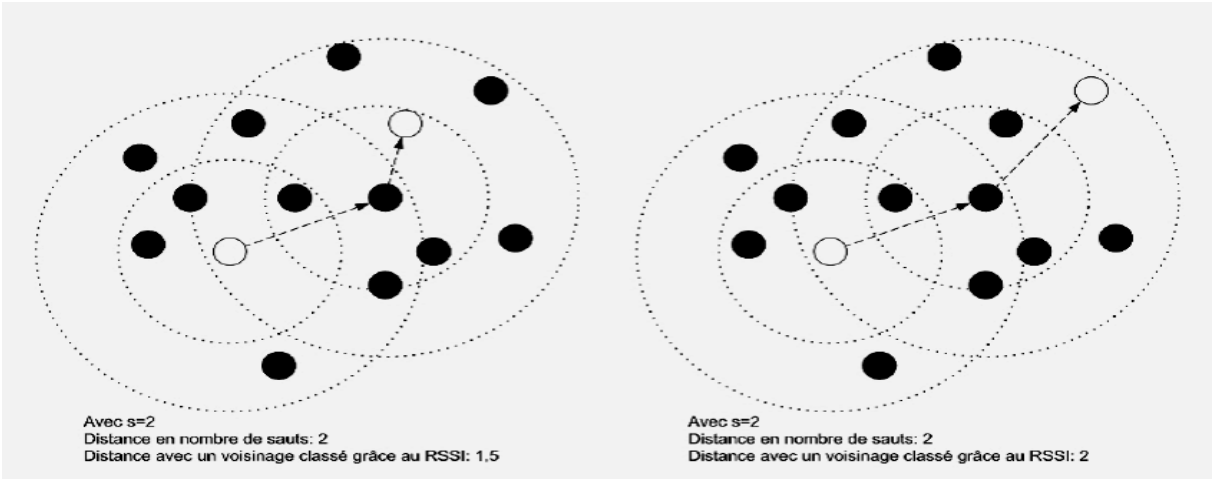


Figure 2.11 : division en classes de voisinage à un saut afin d'améliorer la précision de localisation.

Au mieux, [RAM 09] arrive à obtenir une fluctuation dans une bande « acceptable » de 4-5 dB en faisant abstraction des nœuds défectueux, dans un réseau sans bruit, aucun mouvement physique dans l'environnement et une météorologie favorable.

[THO 08] montre que sur la majorité des liens du réseau de capteurs déployés, le RSSI est compris dans une bande stable mais seulement à long terme. Néanmoins, une proportion non négligeable des liens n'exhibent pas les mêmes propriétés : la dispersion du RSS en fonction du temps, mesurée par l'écart-type, peut aller jusqu'à 7*dB* en raison d'une mobilité à proximité de certains capteurs.

Un exemple assez parlant pour illustrer l'instabilité du RSS est l'utilisation de cette variation pour détecter les intrusions [SAJ 08]. Dans cet article, les auteurs étudient avec succès la possibilité de détecter la présence de mobilité entre plusieurs capteurs en mesurant la puissance du signal reçu.

On peut noter de plus que la puissance du signal n'est pas nécessairement identique d'un capteur à l'autre même dans le cas d'un réseau homogène. Il dépend du niveau d'énergie restant dans la batterie.

2.9. Conclusion:

Si certaines méthodes de localisation s'interdisent d'utiliser ces technologies à cause de leurs erreurs de mesure, il est indispensable, pour celles qui les utilisent, de considérer ces erreurs lors du calcul des positions des capteurs.

[CLE 08] a montré que la précision d'estimation des distances à partir des liens de communication réalisées par les technologies de mesure varie selon plusieurs paramètres liés à l'environnement du réseau (obstacles, degré d'humidité, vitesse du vent,..). Par exemple, les technologies RSSI ou AoA sont fortement déconseillées dans des milieux fermés. Des études ont analysé l'impact de ces paramètres sur les mesures de distances et d'angles. Enfin, d'autres auteurs ont montré que les mesures des distances étaient moins perturbées que celles des angles.

Pour obtenir une métrique de RSS stable et utilisable, il est nécessaire de :

- mesurer le RSS sur plusieurs fréquences distinctes.
- mesurer le RSS sur un temps assez long pour lisser les fluctuations.
- calibrer les capteurs du réseau afin d'obtenir une puissance et une sensibilité d'émission comparable.
- être dans un milieu sans trop d'interférences extérieures (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, comme le

montrent les scénarios mis en avant, l'environnement d'un réseau de capteurs est souvent dynamique (bâtiments intelligents, surveillance de l'environnement, etc.).

Pour l'ensemble des raisons énoncées ci-dessus et si on veut utiliser le RSSI comme métrique pour la mesure des distances, il nous paraît indispensable d'établir une relation stable entre le RSSI et la distance et propre à chaque environnement de déploiement et limiter son utilisation que dans l'environnement favorable.

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.

Dans le chapitre suivant, on Considère le RSSI comme métrique pour l'estimation de la distance entre deux capteurs à porté radio, on se base sur l'équation du bilan de liaison entre un émetteur et un récepteur, on cherche à ressortir la formule qui nous permet d'établir un rapport entre la distance et la puissance du signal reçu afin de mesurer les distances inter capteur dans n'importe quel environnement. Les distances estimées seront utilisées pour localiser les positions des capteurs.

Chapitre 3

Exploitation du RSSI

pour

la localisation dans les WSNs

3.1. 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 du signal reçu (**RSS**) comme métrique pour estimer la distance entre deux capteurs. L'indicateur de puissance du signal reçu (ou **RSSI**) est une estimation par le composant radio du niveau de la puissance du signal reçu. À chaque paquet reçu, le capteur notifie le **RSSI**.

Nous montrons, en nous basant à la fois sur des études précédentes et des expérimentations dans des conditions réelles, que le **RSSI** dépend des conditions de l'environnement de déploiement du réseau de capteurs.

Notre travail consiste à trouver un modèle mathématique proche de ce lui de l'environnement qui nous permet d'établir un rapport entre la puissance du signal reçu par un capteur récepteur et la distance qui le sépare d'un capteur émetteur à porté radio. Ce model mathématique sera utilisé par la suite pour estimer les distances inter capteurs afin de dériver les positions des capteurs déployés dans le réseau.

On se base sur l'équation du bilan de liaison entre un émetteur et un récepteur, on fait une série de mesure de la de puissance du signal reçu par un capteur récepteur à différentes distances et différents environnements, pour pouvoir en faire ressortir le modèle mathématique et voir si on peut valider que la puissance **RSS** était bien issue d'une formule du type l'équation du bilan de liaison.

Afin d'améliorer la précision de la localisation, il faut réaliser un modèle d'atténuation le plus proche de celui de l'environnement dans lequel se trouve les capteurs.

Nous présentons dans la suite de ce chapitre, un ensemble de trois expérimentations afin de voir le comportement du RSSI dans des conditions normales d'utilisation et de déploiement d'un réseau de capteurs et on fait ressortir la formule mathématique qui établit la relation entre le RSSI et la distance entre un capteur émetteur et un capteur récepteur.

3.2. Expérimentation :

Dans cette section nous présentons les scénarios des expérimentations ainsi que les conditions dans lesquelles elles ont été effectuées. Elles ont été réalisées grâce à des capteurs MSP430 de Texas

instruments dans trois environnements différents : un Laboratoire exigu, un couloire plus vaste, et un terrain dégagé (zone ouverte) sans obstacle. L'objectif de ces expérimentations est d'étudier le rapport entre distance et RSSI pour chaque environnement et exploiter les résultats obtenus pour avoir une relation mathématique entre ces deux grandeurs physique permettant d'estimer par la suite les positions des capteurs.

3.2.1. Matériel:

L'ensemble des expérimentations ont été réalisé en utilisant des capteurs MSP430 de Texas instrument fonctionnant dans la bande de fréquences ISM (industriel, scientifique, médical). Cette fréquence, peu utilisée par le grand public, permet d'éviter au maximum les interférences dues aux signaux WIFI ou GSM.

Le kit utilisé est un kit de développement sans fil eZ430-RF2500 est de la 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 et 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. L'antenne utilisée est intégrée au circuit imprimé (antenne PCB) et possède, en théorie, un rayonnement isotrope (les propriétés physiques du rayonnement de l'antenne sont identiques quelque soit la direction).

Le kit se sert de l'environnement de développement intégré IAR Embedded Workbench (Integrated Development Environment IDE) ou CCS (Code Composer Studio) qui s'exécutent sur l'ordinateur-hôte et communique avec le module de programmation pour écrire, télécharger, et debugger une application. Le code en langage C est programmé, compilé puis chargé dans la ROM du micro contrôleur MSP430-F2274 du capteur par l'intermédiaire du programmateur eZ430.

En plus d'IAR, le logiciel venant avec le kit comprend aussi la pile logicielle de communication SimpliciTI qui permet de configurer des réseaux de communication à faible consommation d'énergie.

Les données envoyées par les capteurs (nœuds) sont récupérées par la station de base (sink) branché au pc via le port série USB ce qui va permettre de les stocker et de les traiter.

Pour le capteur MSP430, le RSSI est stocké sur 8 bits dans un registre de la radio. La valeur du RSSI est toujours moyennée sur 8 périodes de temps (128μs).

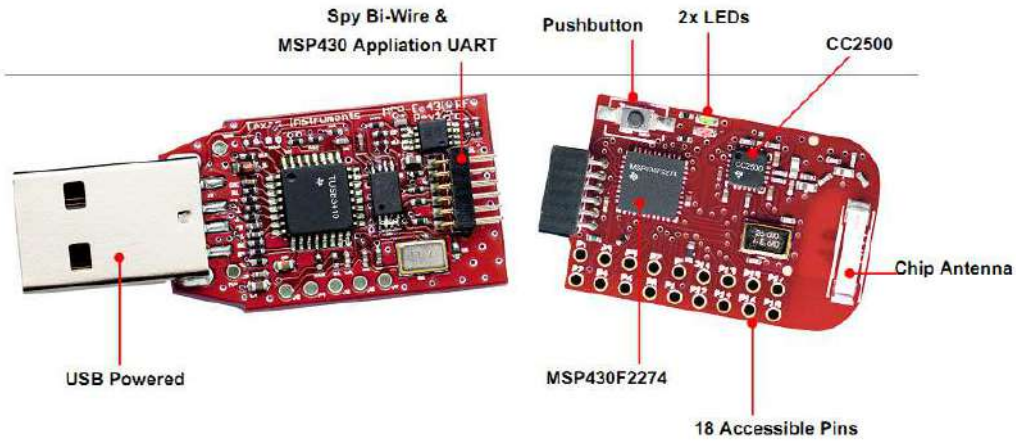


Figure 3.1: Le kit de développement eZ430-RF2500 de Texas Instruments.



Figure 3.2: Le capteur MSP430-RF2500 de Texas Instruments.

De plus amples informations sur l'eZ430-RF2500 sont disponibles á l'adresse : [1]

On **annexe A** vous trouvez la description du capteur MSP 430.

3.2.2. Création du projet du réseau de capteurs sans fil (WSN) sous IAR:

Le manuel [THO 10] contient les directives de création des projets des réseaux de capteurs sans fils pour les MSP430 sous IAR Embbeded Workbench (IDE) l'environnement de développement intégré de Texas Instruments.

La principale plateforme de travail utilisée pour ce projet est le logiciel IAR Embedded Workbench qui permet de faire la compilation du code C en assembleur MSP430. La société IAR System, qui développe ce logiciel, est spécialisée dans les outils de développements pour systèmes embarqués. Leurs logiciels sont conçus pour programmer les microprocesseurs de très nombreux fabricants. La version du logiciel IAR Embedded Workbench qui a été employée pour cette implémentation est la version 5.4.

Texas Instruments a développé un ensemble de pilotes pour le Kit eZ430-RF2500 dans le cadre du projet SimplicitTI. Le rôle de ces pilotes est expliqué en **annexe B**.

Pendant la création du projet on déclare le type du microcontrôleur (MSP430-F2274), la radio (CC2500) monté sur le capteur et les pilotes nécessaires dans leurs champs spécifique afin qu'ils seront chargés dans le projet crée.

Les pilotes nécessaires pour le projet WSN nommé txrx_wsn sont :

Bsp: (Board Support Package). Contient les fichiers pour les services de base, les fichiers de macro utilitaires et charge tous les drivers des composants de la carte.
Mrfi : (Minimal RF Interface). Assure tous les fonctions et les applications concernant la radio, il défini les objectifs d'abstraction pour la radio et contient tous les fichiers pour les services minimaux de l'interface radio fréquence.
Gradient : assure la mise à jour, l'initialisation du réseau, détection d'un nouveau capteur, construction des paquets (donnée, Ack, Uf , cw etc…), gestion du protocole de communication et le routage multi saut dans le réseau ainsi que plusieurs autres applications.

Après la création du projet WSN on obtient la plate forme représenté par la figure 3.3 et c'est le moment de programmation des capteurs on déclarant celle qui sera une station de base (sink) et les capteurs qui seront des nœuds simples. Le programme est chargé dans la mémoire flash du microcontrôleur (MSP430F2274) de chaque capteur par le biais du programmateur eZ430 branché au port USB du pc bien sur après installation de son pelote **TI Sensor Monitor** Téléchargé du site [2].

L'outil de développement IAR utilisé pour la programmation, la compilation et le chargement du programme dans les capteurs est téléchargé du site [3] et il est installé avec les paramètres par défaut.

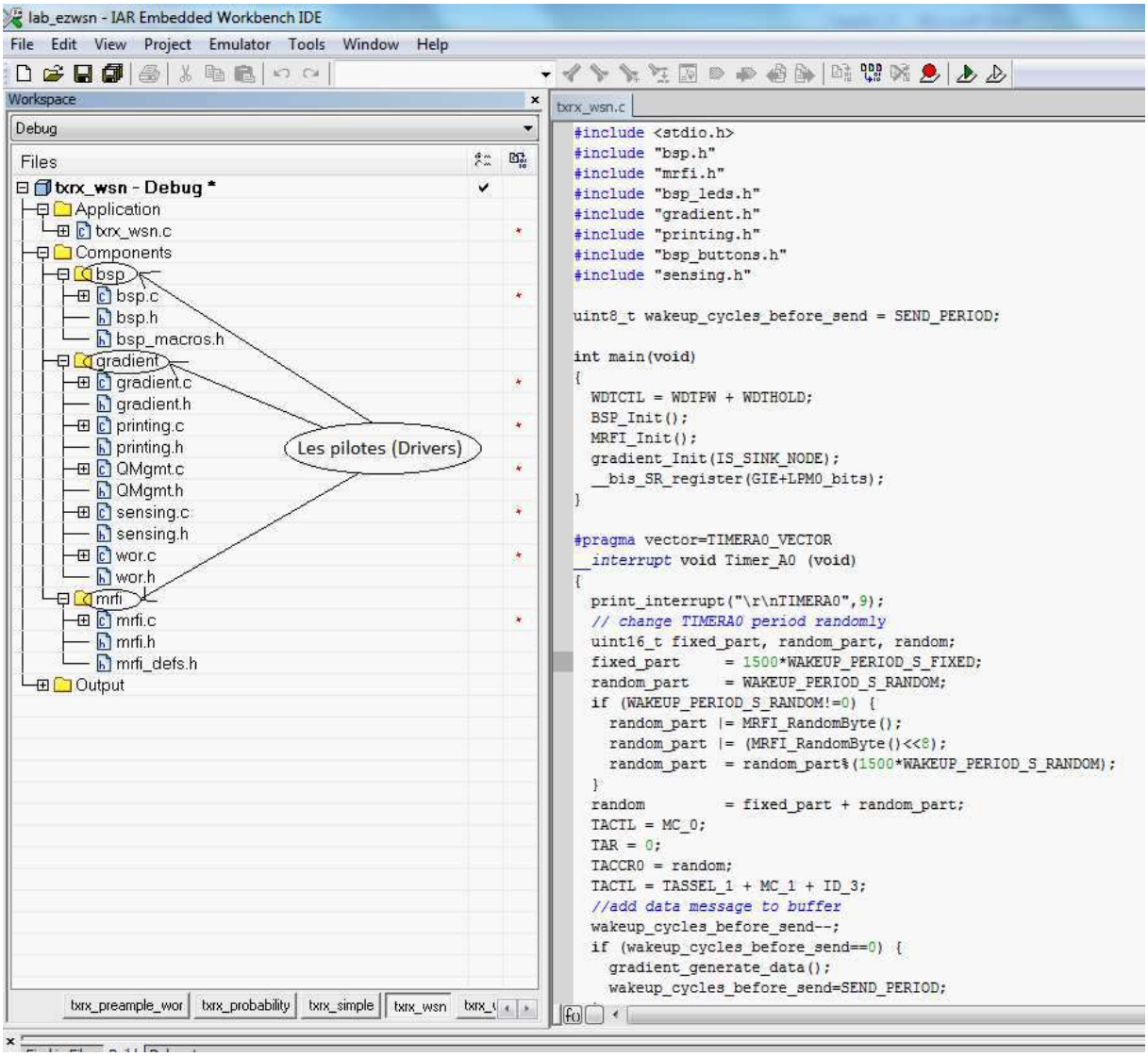


Figure 3.3: L'environnement IAR.

3.2.3. Programmation des capteurs :

Les expériences ont été réalisées par des capteurs communiquant via des liens radio. Le programme nommé txrx_wsn.c assure la communication entre les capteurs du réseau. Chaque capteur transmis un message à ces voisins tous les 5 secondes à une puissance de -15dBm sur le canal 0. La station de base récupère tous les paquets venant à partir des capteurs du réseau.

L'algorithme du programme txrx_wsn.c est inspiré de celle CSMA/CA sans utilisation des paquets de synchronisation RTS (Request To Send) et CTS (Clear To Send), c'est une méthode pour réduire la consommation d'énergie elle a été proposée sous le nom "préambule d'échantillonnage" (preamble sampling). En **annexe C** vous trouvez une explication détaillée du principe de l'algorithme d'émission et de réception des baquets de données par un capteur ainsi que les organigrammes sur lesquels il s'est basé le développement du programme txrx_wsn.c.

La figure (3.4) montre l'organigramme qui traduit l'algorithme général d'émission et de réception des paquets par un capteur.

Une LED verte : témoigne une transmission d'une information (donnée ; AcK etc…).
Une LED rouge : témoigne la réception d'une information (données ; AcK etc…).

Le microcontrôleur peut exécuter une séquence de commandes ou rester dans un état de basse consommation (LPM: Low Power Mode). Lors d'une interruption le microcontrôleur sauve sa pile et exécute la routine de l'interruption.

Le capteur se dispose également d'un oscillateur local qui fonctionne à une fréquence maximale de 8 MHz, et qui permettrait d'avoir des références temporelles différentes, celles ci peuvent être utilisées pour le calcul d'un délai et la mise en place d'une séquence qui s'exécute périodiquement.

La réception d'un message provoque une interruption qui fait appel aux fonctions relatives au module Rx. De même, répéter l'envoi d'un message avec un certain délai tant qu'on n'a pas reçu son acquittement peut être programmé en utilisant le timer, qui une fois le compteur arrive à la valeur correspondant au délai, exécute le module Tx.

Le module CC2500 utilisé dans le cadre de ce travail offre plusieurs outils pour adapter les capteurs aux caractéristiques du réseau envisagé. En plus, des pilotes qui contiennent des modules préprogrammés sont téléchargeables depuis le site de Texas Instruments [7].

Texas Instruments fournis plusieurs pelotes du CC2500, ces drivers font partie des projets de SimpliciTI et sont téléchargeable gratuitement du site [8] qu'on peut l'utiliser.

On a commencé par la mise en place de la plateforme en réalisant des exercices simplistes, mais qu'on utilisera par la suite pour la réalisation du projet. En parallèle avec ce travail, je me documentais sur les protocoles publiés.

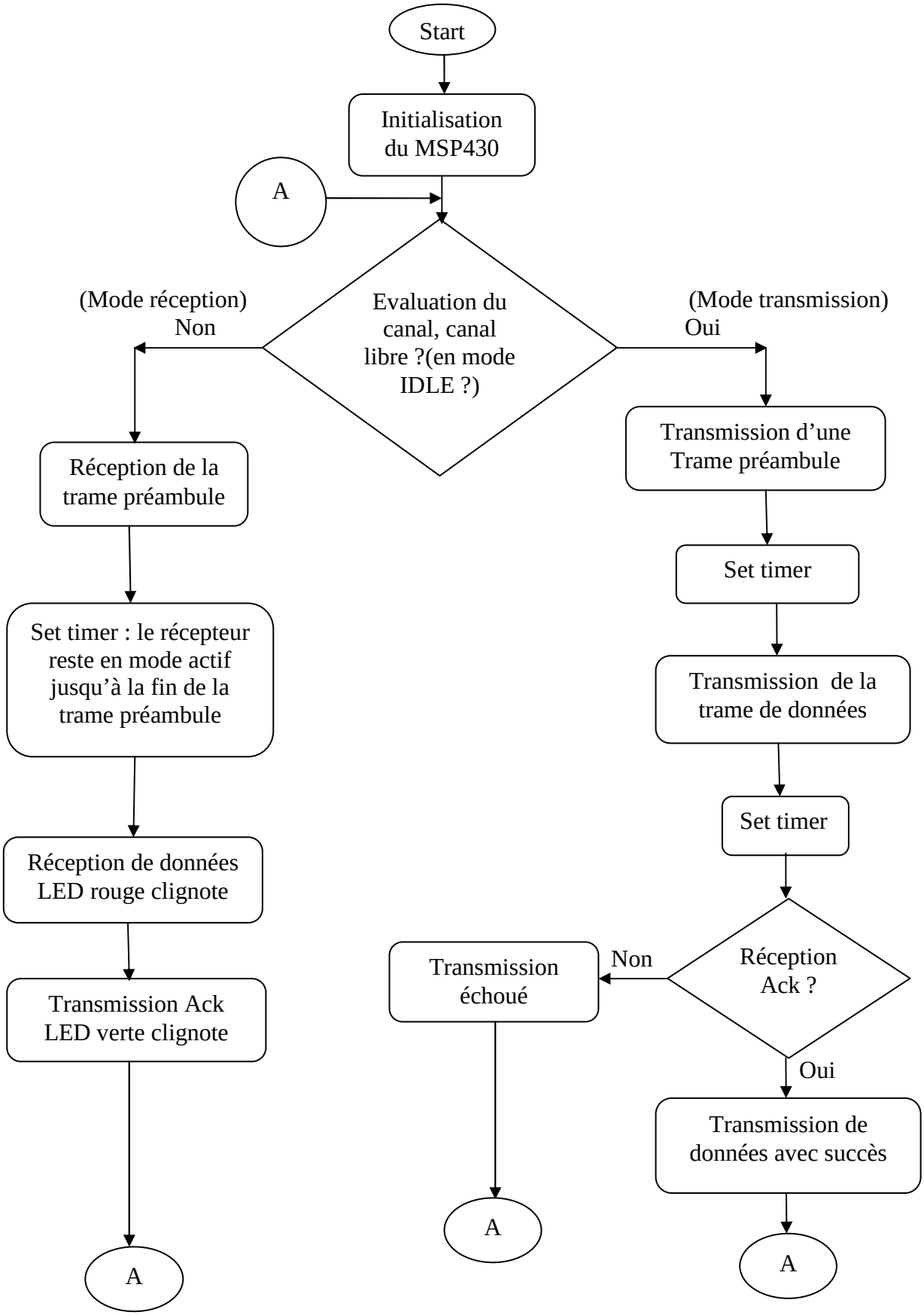


Figure 3.4: Organigramme général d'émission et de réception des paquets de donnée par un capteur.

Pendant les premières semaines du projet, j'ai procédé à l'installation des outils de développement et de débogage, notamment à la compréhension des nouveaux pilotes.

Ensuite, l'objectif était de programmer l'émission d'un paquet par un capteur A vers un capteur B. A` ce niveau, A exécutait le module Tx et B exécutait le module Rx. Une fois ce modèle primaire de communication réalisé, j'ai ajouté l'acquittement d'un message par B vers A. Pour cela on a synchronisé les modules Tx et Rx pour le même capteur et on a utilisé les fonctions du timer, pour que A émet un même message vers B avec un certain délai jusqu'à ce que l'acquittement de B soit reçu par A.

Après tous ces entrainements de programmation des capteurs on a réussis à avoir un programme complet nommé txrx_wsn.c qui permet de faire la communication par lien radio entre les capteurs. En **annexe C** vous trouvez le code source du programme txrx_wsn.c.

3.2.4. Technique de récupération des RSSIs :

Au moment où les capteurs peuvent communiquer entre eux par liens radio, la valeur du RSSI peut être notifiée 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.

Un programme nommé txrx_wsn.py développé en langage python exécuté sous un scripte CYGWIN nous a permis avec l'association d'autres applications logicielles (qui seront citées par la suite) de lire et d'afficher sur pc les valeurs des RSSIs de chaque capteur du réseau.

Les applications logicielles indispensables sont :

- **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 [4].

- **PuTTY :** est utilisé pour lire les données du port COM série crée par L'eZ430-CC2500 lorsqu'il est connecté au PC. Téléchargé du site [5].

- **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 rediriger l'affichage sous Windows d'une application graphique tournant sur une machine distante, sous un autre système supporté par X.org. Téléchargé du site [6].

En **annexe D** vous trouvez les packages de CYGWIN installés et le code du programme txrx_wsn.py.

Après programmation des deux capteurs, de la station de base et installation de toutes les applications logicielles nécessaires sur le PC, les deux capteurs ont été alimentés et séparer d'une distance d, la station de base a été brancher au port USB du PC et le programme txrx_wsn.py a été exécuté sous CYGWIN permet de lire les informations récoltées du réseau via le port COM série.

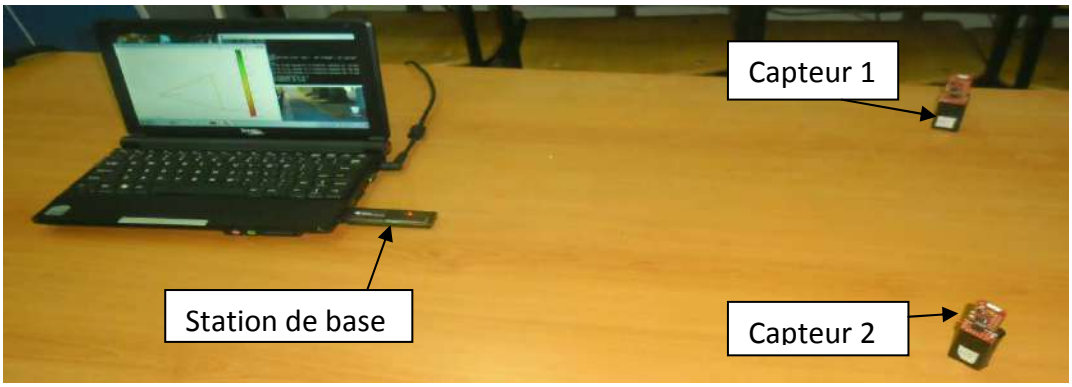


Figure 3.5: la seine d'essai de l'application et test des programmes.

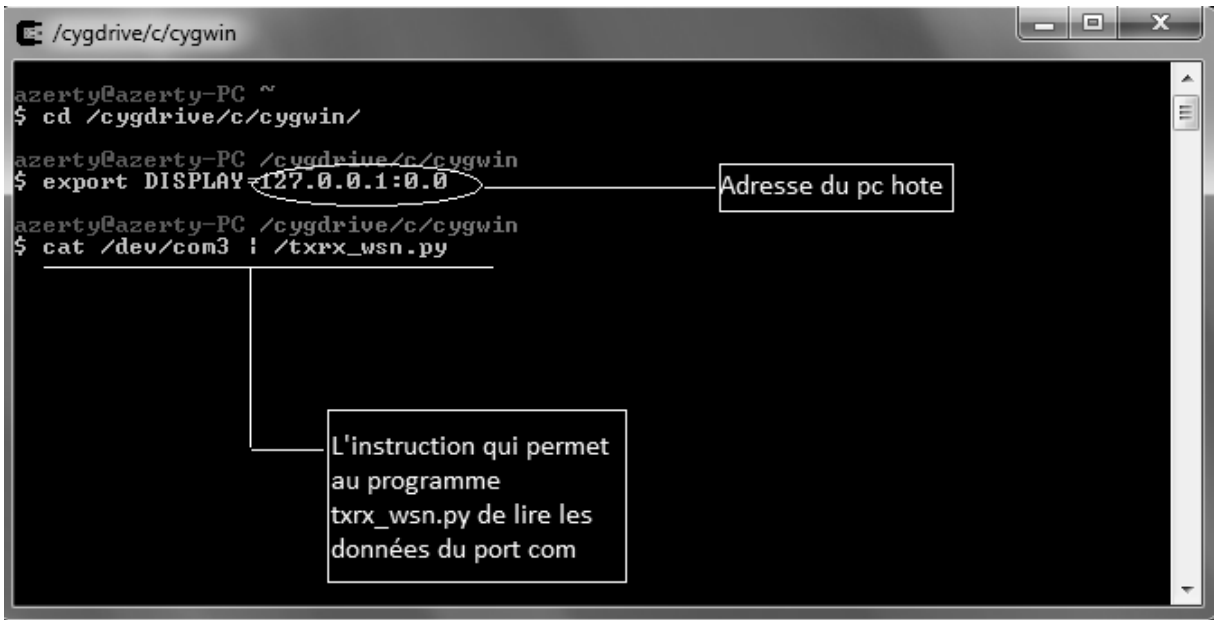


Figure 3.6: capture d'écran de l'environnement CYGWIN.

L'exécution du programme txrx_wsn.py affiche les deux fenêtres représentées par les figures (3.7) et (3.8)

Une fenêtre qui représente la carte relative du réseau WSN (figure 3.7). La carte du réseau de capteurs sans fil c'est une sorte d'une carte de la puissance du signal reçu sur la zone de déploiement, chaque capteur va mesurer la puissance du signal reçu de chaque capteur voisin et fournir un vecteur qui correspond à une sorte d'« empreinte » RSSI. Ils créent donc une carte relative du réseau. Par relative, nous entendons une carte qui est à une translation, une rotation orthogonale, une réflexion et une dilatation près de la' vraie' carte. Autrement dit, c'est une carte qui conserve les rapports entre les distances entre tous les points. C'est un système de coordonnées « virtuelles » (différent du système terrestre). Elles ne nécessitent pas de module de localisation et attribuent aux capteurs des positions (coordonnées virtuelles) dans ce système.

Ce programme est basé sur la méthode libre ancres expliquée dans le chapitre 2 paragraphe 2.6.1 n'est pas utilisée pour la localisation dans le sens géographique du terme, mais plutôt pour l'identification ou l'adressage des capteurs, elle nous montre les capteurs présents dans le réseau, les liens radios, les coordonnées virtuelles, les adresses physique et les niveaux d'énergie des batteries de chaque capteur.

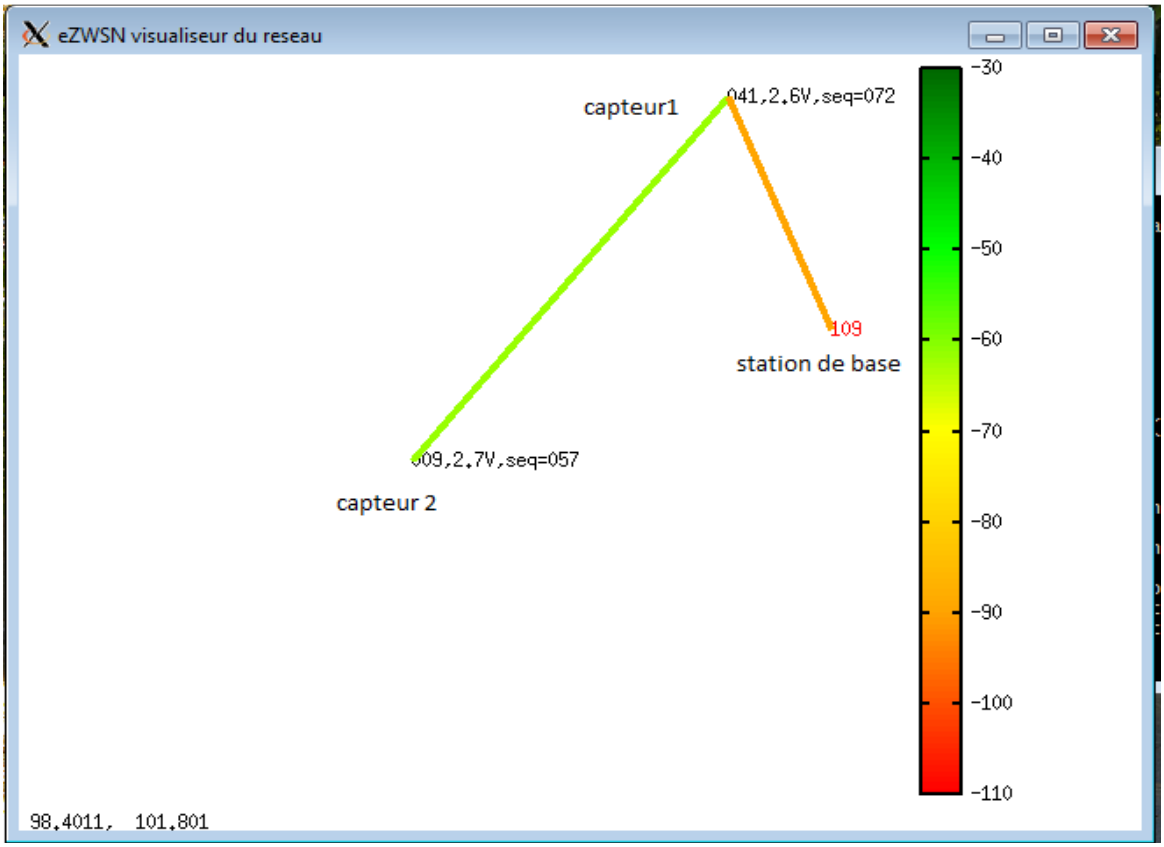


Figure 3.7: Capture d'écran de la carte relative du réseau WSN.

Sur la fenêtre CYGWIN figure 3.8 on peut lire directement les valeurs des RSSIs entre chaque deux capteurs voisins, l'adresse physique de chaque capteur, le niveau d'énergie de la batterie et les coordonnées virtuelles de chaque capteur sur la carte.

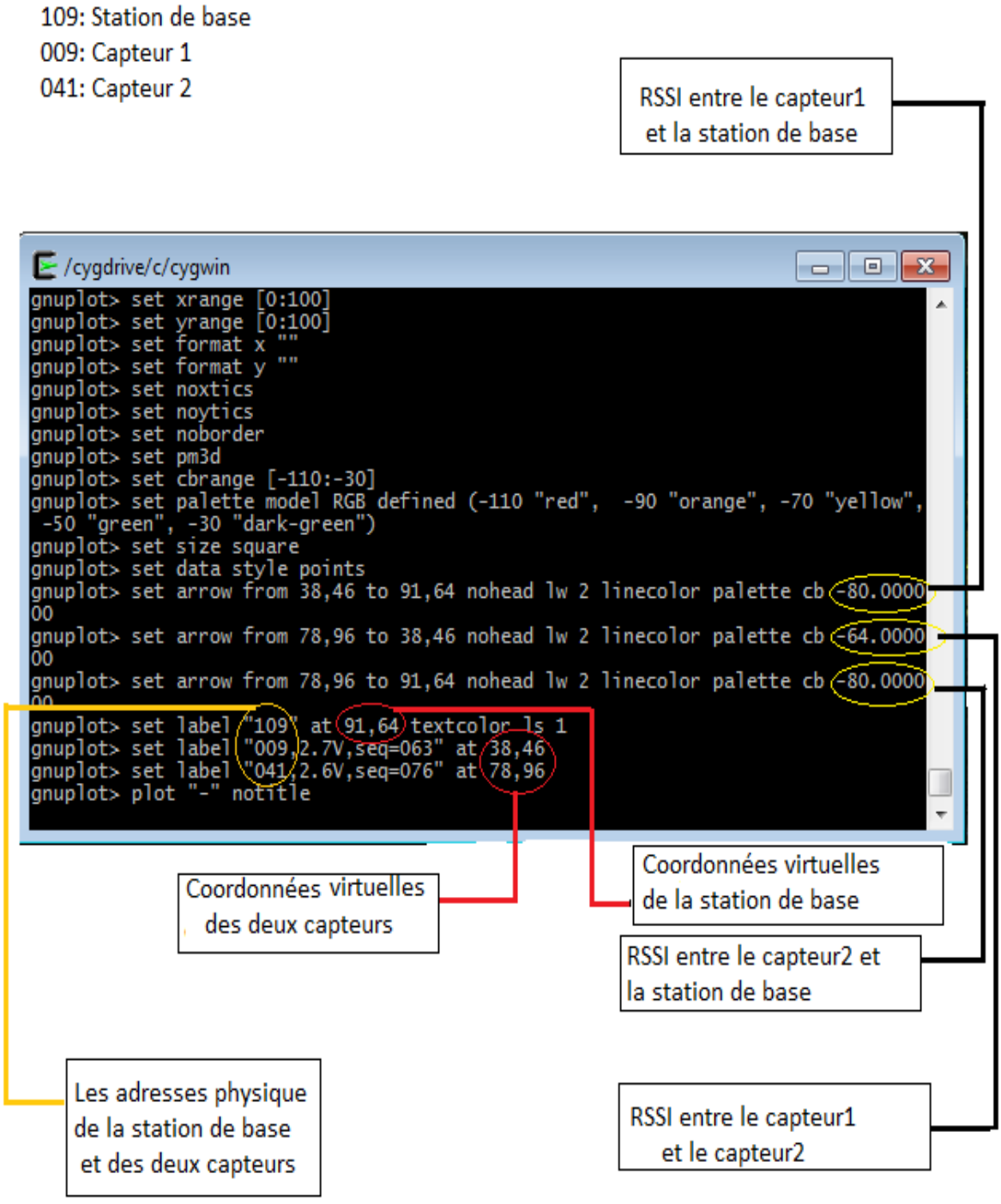


Figure 3.8: capture d'écran de la fenêtre CYGWIN. Collecte des informations du réseau.

Les niveaux des batteries des capteurs C1 et C2 sont respectivement à 2.7 volts et 2.6 volts.

3.2.5. Environnements et scénarios des expériences :

Les expérimentations sont réalisées dans 3 environnements différents : un laboratoire exigu, un couloir vaste et un terrain plat et dégagé. L'objectif est de montrer que l'environnement joue une part essentielle dans les mesures de RSSI.

Dans le cas de laboratoire et du couloir, la dynamique propre à ces environnements est conservée: des personnes se déplacent, des portes ou des fenêtres s'ouvrent et se ferment, etc. Ces conditions réalistes correspondent aux applications définies au par avant. Pour l'expérimentation sur le terrain de dégagé, il n'y a en revanche presque aucune dynamique.

Le scénario « RSSI-distance » sera réalisé sur une série de trois expérimentations dans trois environnements différents de la façon suivante. Nous prenons deux capteurs installés en vie directe et une station de base branchée à l'ordinateur pour collecter les données échangés entre les deux capteurs. La station de base reçoit les RSSIs notifié par la radio de chaque capteur ensuite ces données seront affichées sur le pc.

Durant toutes les expériences on fixe un capteur et on déplace le deuxième d'une distance *d*=0,25mètre ou 0.5m jusqu'à une distance D qui est déterminée et limitée soit par la géométrie de la seine où se déroule l'expérience ou soit par l'atténuation du RSSI, la puissance d'émission du capteur transmetteur est de -15 dBm, Les distances maximales correspondent à la limite au-delà de laquelle le signal est trop faible ou détérioré pour être décodé convenablement. On prélève à chaque distance d la valeur moyenne de 10 mesures de la valeur RSSI mesuré entre les deux capteurs.

La distance entre les deux capteurs varie de 0,5 mètres jusqu'à une distance de 6 mètres dans le laboratoire, jusqu'à 12 mètres dans le couloir vaste et jusqu'à 14 mètres sur le terrain dégagée.

Les 3 expérimentations ont été réalisées en utilisant les mêmes capteurs. L'objectif de ces 3 expérimentations est de montrer que la puissance reçue par un capteur est dépendante de l'environnement de déploiement et déférente selon la direction du capteur récepteur par rapport au capteur transmetteur.

Pour monter l'influence de la direction de du capteur récepteur par rapport au capteur transmetteur on a répété l'expérience dans un couloir vaste pour les quatre (4) directions du capteur récepteur.

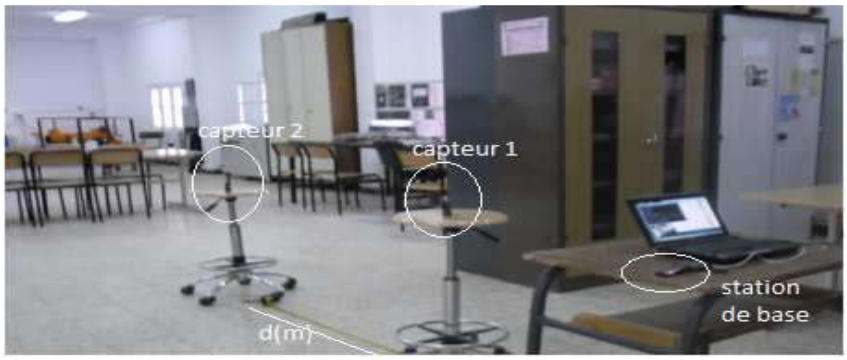


Figure 3.9: Environnement laboratoire.



Figure 3.10: Environnement couloir.



Figure 3.11: Environnement terrain dégagé.

3.2.6. Résultats des Scénarios « RSSI et distance» :

Durant toute la durée des expérimentations, les capteurs restent en vue directe, aucun obstacle n'est présent entre eux.

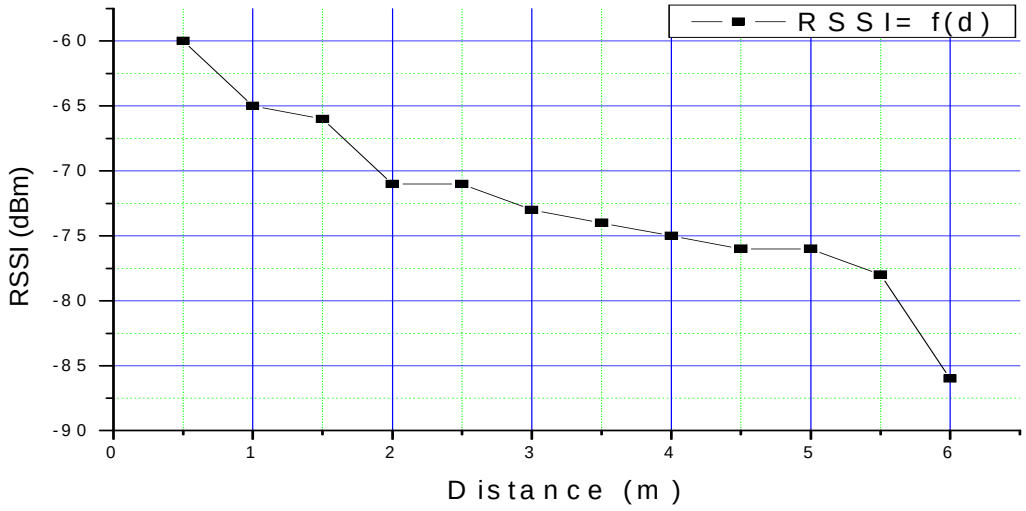


Figure 3.12: Scénarios « RSSI et distance» dans un laboratoire.

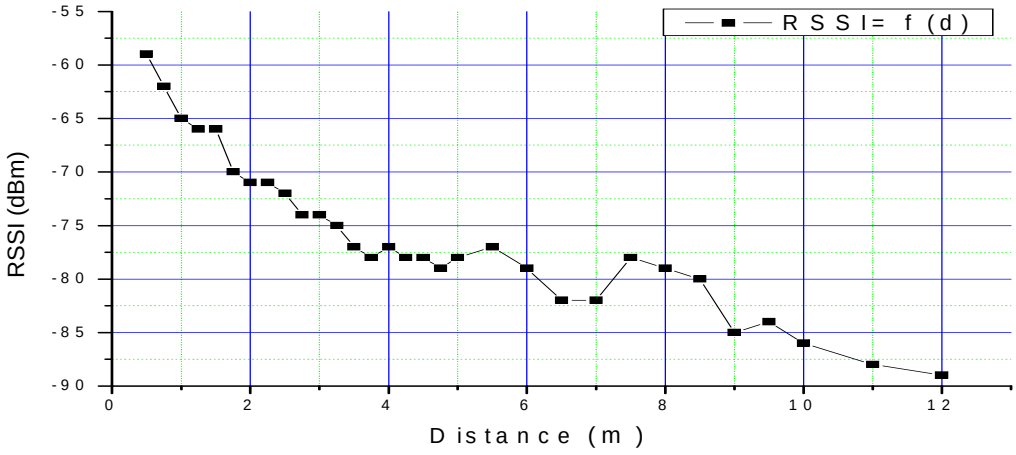


Figure 3.13: Scénarios « RSSI et distance» dans un couloir.

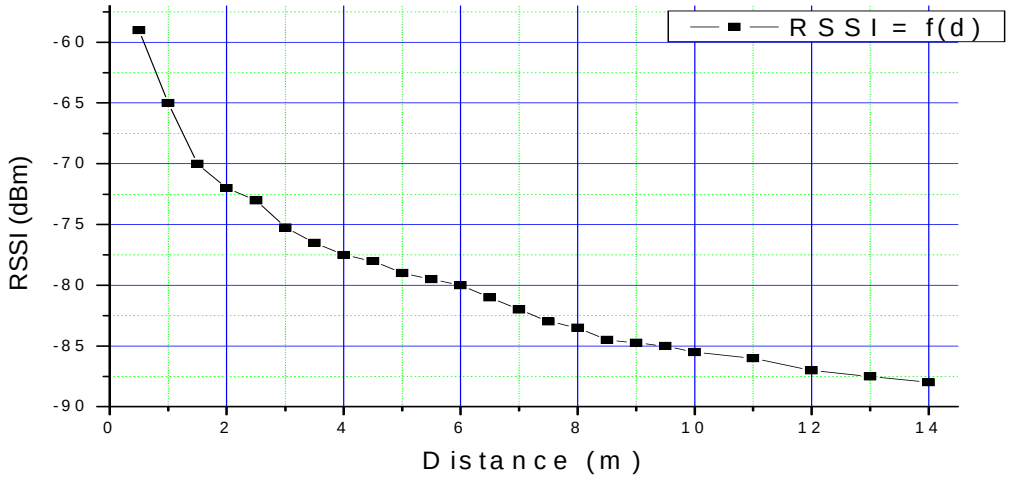


Figure 3.14: Scénarios « RSSI et distance» sur un terrain plat et dégagé.

Pour une meilleure interprétation des résultats obtenus on a regroupé les trois courbes sur un même graphe.

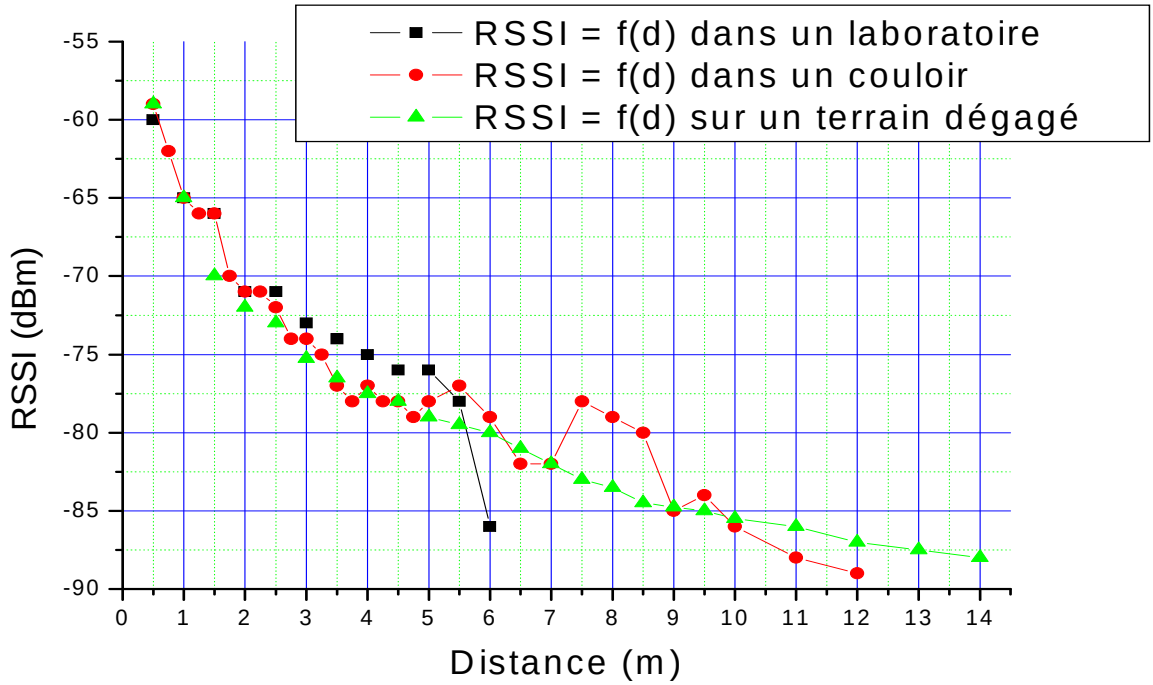


Figure 3.15: Scénarios « RSSI et distance» dans les trois environnements de l'expérimentation.

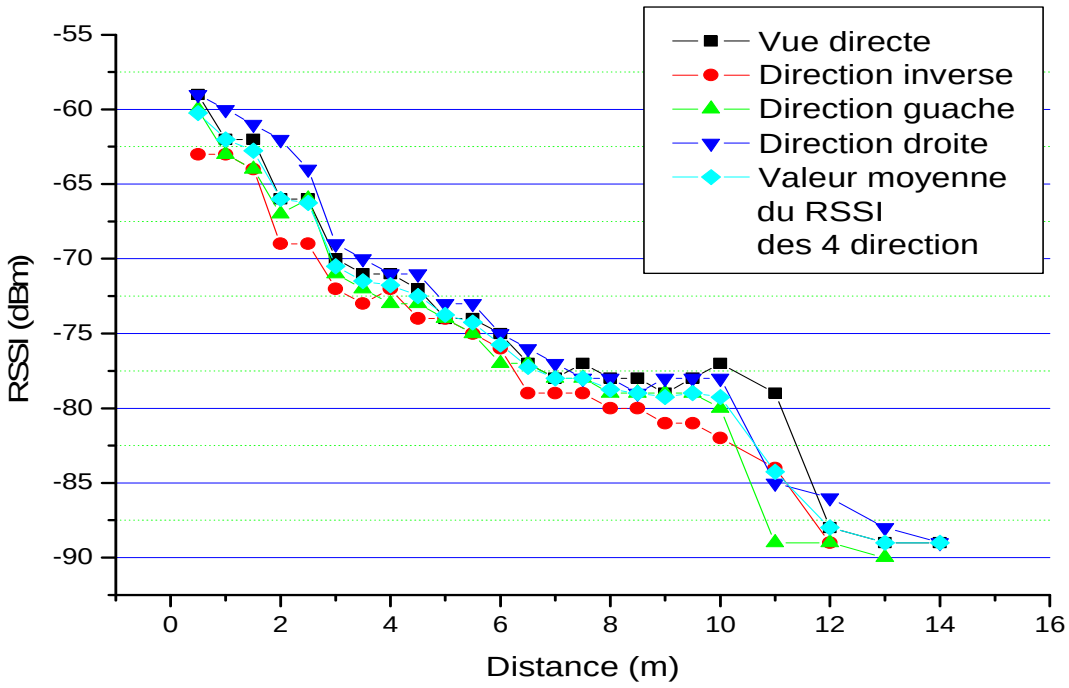


Figure 3.16: Scénarios « RSSI et distance» dans un couloir (l'influence de la direction du capteur sur la puissance reçu).

3.2.7. Interprétation des résultats:

Les courbes précédentes donnent les valeurs des RSSI obtenues pour chaque environnement (laboratoire, couloir et terrain dégagé sans obstacles).

Les mesures de RSS obtenues par le capteur sont presque semblables sur les courtes distances de 0,5 à 1 mètre. Alors que la puissance du signal reçu par le capteur reste comprise entre $-59dBm$ à $-65dBm$, au de là, la puissance reçue par le capteur est beaucoup plus fluctuante. Ces « trous » de puissance peuvent s'expliquer par les effets destructeurs du multi-trajet [AND 05].

Le signal reçu par le capteur récepteur est constitué de deux composantes : le signal propagé en ligne droite et le signal réfléchi sur le sol. La différence de temps d'arrivée des deux signaux peut créer ces zones où le signal va être plus faible. Un laboratoire de taille modeste possède de nombreuses surfaces (sol, murs, appareils, armoires, tables, etc.) qui vont réfléchir le signal. D'une position du capteur à une autre, le phénomène de multi-trajet engendre des signaux qui peuvent être destructifs et affaiblir la puissance reçue lors de la réception d'un paquet, ou, à l'inverse, des signaux constructifs qui augmentent la puissance reçue. De plus, la faiblesse de puissance du signal reçue même à courte distance trouve son explication à la fois dans l'atténuation du canal de transmission et dans la faible qualité des antennes PCB.

Lors de ces expérimentations, on remarque que plus la distance entre le capteur récepteur et le capteur transmetteur est grande et plus on observe une grande volatilité des mesures de RSS. Car plus le signal est faible, plus il est sensible aux signaux réfléchis. Il est donc naturel d'avoir une plus forte variation pour des distances plus importantes. Cela signifie qu'au-delà d'une certaine distance, le RSSI devient imprédictible et ça ce vois très bien dans l'expérience faite dans le laboratoire et dans le couloir.

Dans le cas du changement de direction du capteur récepteur (figure 3.16) Cette différence de mesure s'explique par un rayonnement non parfaitement isotrope de l'antenne PCB. Une antenne isotrope est un modèle théorique irréalisable dans la pratique : dans la réalité, l'énergie rayonnée est inégalement répartie dans l'espace. En effet, malgré une conception de l'antenne prévue pour respecter au maximum cette contrainte, des différences de puissance apparaissent en fonction de la direction de l'antenne.

Il existe un autre facteur que le multi-trajet pour expliquer les différences de mesure du RSSI quand la distance augmente. Plus la distance entre les capteurs augmente et plus la probabilité qu'une

interaction avec des personnes présentes dans l'environnement augmente (passage entre les capteurs, ouverture/fermeture de portes, etc.).

Nous avons vue l'ensemble des champs d'application les plus courants des réseaux de capteurs. Dans chacun des scénarios envisagés (surveillance environnementale, bâtiment intelligent, domotique), il est probable qu'il existe, de façon non marginale, une dynamique à l'intérieur du réseau. Si le RSSI doit être utilisé comme métrique dans ce type de réseau, il nous paraît important de la prendre en compte. C'est pour cette raison que nous n'avons pas interdit le passage entre les capteurs, sans toutefois le favoriser. Ce passage est donc très limité. En revanche, la présence de mobilité à l'intérieur du réseau et le rayonnement non uniforme de l'antenne vont créer à la fois des incohérences dans le rapport RSSI-distance.

Pour le terrain dégagé (l'extérieur) Cet environnement est particulièrement favorable : espace ouvert et pas de mobilité à l'intérieur du réseau. Nous retrouvons dans cette configuration, un comportement différent des mesures effectuées à l'intérieur: la décroissance du RSSI mesuré est moins brutale et les puissances de réceptions relevées sont plus importantes. Le capteur relève des puissances comparables entre le 1*m* et 14*m*, le signal reçu par le capteur tombe de –59*dBm* à -88*dBm*, la courbe RSSI distance ne présente pas des fluctuations importante mais à par quelque très faible déformations aux points de distances (2.5, 6, 9.5 et 11) mètre qui s'explique par un rayonnement non isotrope de l'antenne malgré l'absence de dynamique dans le réseau et des conditions particulièrement favorables.

3.2.8. Conclusion 1:

Les réseaux de capteurs sont déployés dans des milieux dynamiques, c'est-à-dire des environnements dont les propriétés physiques ou structurelles sont susceptibles d'être modifier à tout moment (changements météorologiques, mobilité d'objets ou de personnes à l'intérieur du réseau, diminution de l'énergie, etc.).Nous avons démontré que les propriétés de l'environnement dans lequel étaient déployés les capteurs influent sur la perception du RSSI : en terme de rapport entre RSSI et distance et en terme de volatilité des mesures. De plus, indépendamment de l'environnement nous trouvons que les puissances reçus sont différentes selon la direction du capteur transmetteur. La faible qualité des antennes PCB expliquent ces phénomènes.

En conclusion, le RSSI, utilisé comme métrique de proximité, peut être n'est pas fiable à l'intérieur en raison de son imprédictibilité et de son instabilité. Cette imprédictibilité est due à plusieurs facteurs qui sont :

- ***En premier lieu, l'environnement :***
  - Si l'environnement est dynamique, les interférences vont perturber le RSSI. Les effets des « zones d'ombre » vont entrainer une faible stabilité à court et long terme.
  - Si l'environnement est réduit, les effets de multi-trajet vont introduire des incohérences dans le rapport entre le RSSI et la distance.
- ***En second lieu, le matériel :***
  - La qualité relative des composants intégrés au capteur (antenne principalement) va entrainer des propriétés de transmission et de réception du signal différente selon la direction.
- ***Et en troisième lieu, la distance :***
  - Plus la distance est grande, plus la stabilité du RSSI va être faible. Cela s'explique par une grande sensibilité du signal aux interférences, aux multi-trajets et une grande probabilité de shadowing« zones d'ombre ».

Le RSSI, utilisé comme métrique de proximité, peut être fiable à l'extérieur en raison des caractéristiques de l'environnement « terrain dégagé » qui entraînent une meilleure propagation du signal avec de moins fortes conséquences du multi-trajet.

3.3. Recherche d'un modèle type entre le RSSI et la distance:

Les mesures du RSSI sont tracées sur un graphe en fonction de la distance d, où les résultats n'étaient pas une fonction ou une droite connue pour pouvoir en déduire la formule exacte. Néanmoins, cela est peu probable et c'est pourquoi il aurait été intéressant et malgré tous ces faiblesses de la mesure de la puissance du signal reçu dans le cadre des réseaux de capteurs sans fil de chercher une relation stable entre le RSSI et la distance d pour chaque environnement qui nous permis de déduire et d'estimer les distances qui s'éparent les capteurs voisin dans un réseau de capteurs sans fils. La technique est la suivante:

- linéarisation de la courbe RSSI=f(d).
- Interpolation des points trouvés pour en sortir par une relation mathématique entre le RSSI et la distance d.

➢ *Linéarisation de la courbe RSSI=f(d) :*

Le RSSI est la mesure de la puissance en dBm qui est définie comme dix fois le logarithme du rapport de la puissance reçu ($P_{Reçu}$) et une puissance de référence ($P_{réf}$) =1mW. Le RSSI est proportionnel à 10 log($P_{Reçu}/P_{réf}$), Cela signifie que le RSSI est proportionnel à log ($P_{Reçu}$). RSSI α 10 log($P_{Reçu}$).

Il est connu que l'atténuation de la puissance d'un signal entre un point émetteur et un récepteur est proportionnel à l'inverse du carrée de la distance ($1/d^2$) parcouru par le signal. En d'autres mots, le RSSI est proportionnel au log ($1/distance^2$), on simplifiant cette relation on peut conclure que le RSSI est proportionnel au –log(d). C'est-à-dire que RSSI est inversement proportionnel au log(d). RSSI α [-log(d)].

Un modèle mathématique de l'atténuation du signal est souvent ressorti de l'équation du bilan de liaison c'est celle de l'équation **(2.7)** est utilisé par les chercheurs qui considère le RSSI comme métrique pour estimer la distance entre un émetteur et un récepteur.

$$Prssi = \left(\frac{\lambda}{4*\pi*r}\right)^2 GeGrPe$$

On constate qu'il s'agit d'un modèle en $\frac{1}{r^2}$ et donc plus les capteurs sont éloignés, moins la mesure sera précise.

$$Prssi(dBm) = 10\log\left[\left(\frac{\lambda}{4*\pi*d}\right)^2 GeGrPe\right] \quad (3.1)$$

$$Prssi(dBm) = -20\log(d) + 10\log\left[\left(\frac{\lambda}{4*\pi}\right)^2 GeGrPe\right]$$

$$10\log\left[\left(\frac{\lambda}{4*\pi}\right)^2 GeGrPe\right] = Constante \quad (3.2)$$

Donc (3.1) peut s'écrire :

$$Prssi(dBm) = -20\log(d) + K \quad (3.3)$$

Dans le cas général :

RSSI = A log(d) + K (3.4) et **$d=f(RSSI)=10^{\left[\frac{RSSI-K}{A}\right]}$** (3.5)

Avec : A= -n∗(10)

A est la pente de la droite RSSI= f (log(d)) et la constante K est la valeur du RSSI à une distance d=1m de l'émetteur.

On trace la courbe RSSI=f [log(d)] à l'aide des valeurs des RSSI mesurés et voir si on obtient une droite linéaire de pente négative pour pouvoir en déduire la formule exacte du RSSI en fonction du logarithme de la distance (d). Néanmoins, si aucune droite n'apparaissait, il fallait alors passer à une solution mathématique plus poussée.

- ***L'interpolation des valeurs des RSSIs évalués :***

Si aucune formule n'est apparue, on fait tout de même l'hypothèse que le RSSI varie continuellement et de manière strictement décroissante avec le logarithme de la distance, sans connaître de pics importants. En prenant des mesures bien reparties, il est alors facile d'interpoler les valeurs relevées pour en tirer une fonction s'approchant de la réalité.

3.3.1. Linéarisation et interpolation des valeurs des RSSI mesurés :

Pour chaque environnement on fait une linéarisation des valeurs mesurées du RSSI en traçant la courbe RSSI=f (log(d)) ensuite une interpolation des points obtenus pour pouvoir avoir une relation mathématique entre le RSSI et la distance d.

Si le coefficient directeur de la droite trouvée était bien – 20(ou -n*10), alors nous aurions pu valider que la distance était bien issue d'une formule du type l'équation du bilan de liaison et que l'exposant de propagation est n=2 (pour un milieu sans atténuation et une communication sans obstacle). Ainsi le graphe généré peut servir comme une courbe standard qui peut ensuite être employée par un capteur récepteur à estimer la distance à laquelle un capteur émetteur est situé.

Après la linéarisation et l'interpolation des valeurs des RSSI=f(log(d)) on a obtenu les résultats suivants :

Après linéarisation et interpolation on a aboutis à une fonction linéaire de la forme :

$$RSSI = A.\log(d) + K$$

Avec :

ξ_A : Erreur d'interpolation sur le coefficient A et ξ_K : Erreur d'interpolation sur la constante K.

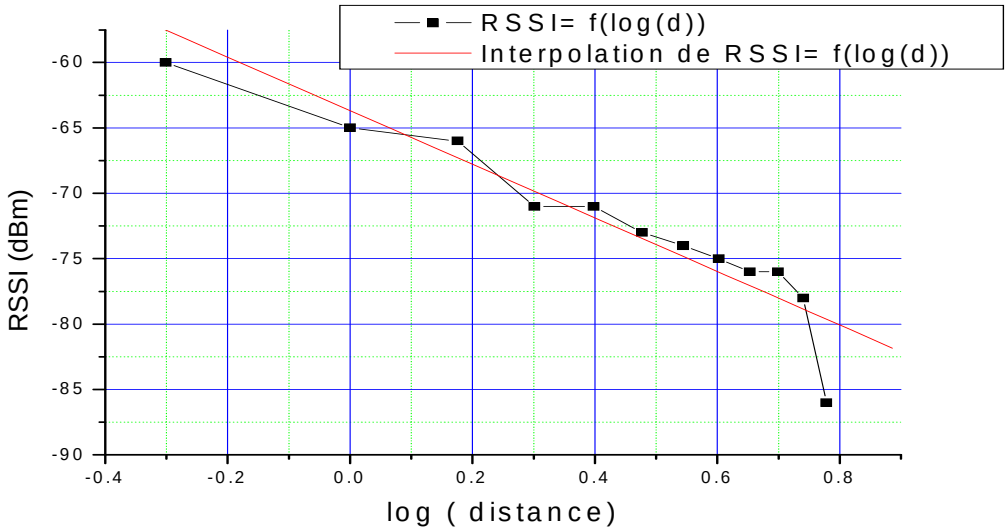


Figure 3.17: RSSI vs log(d) dans un laboratoire.

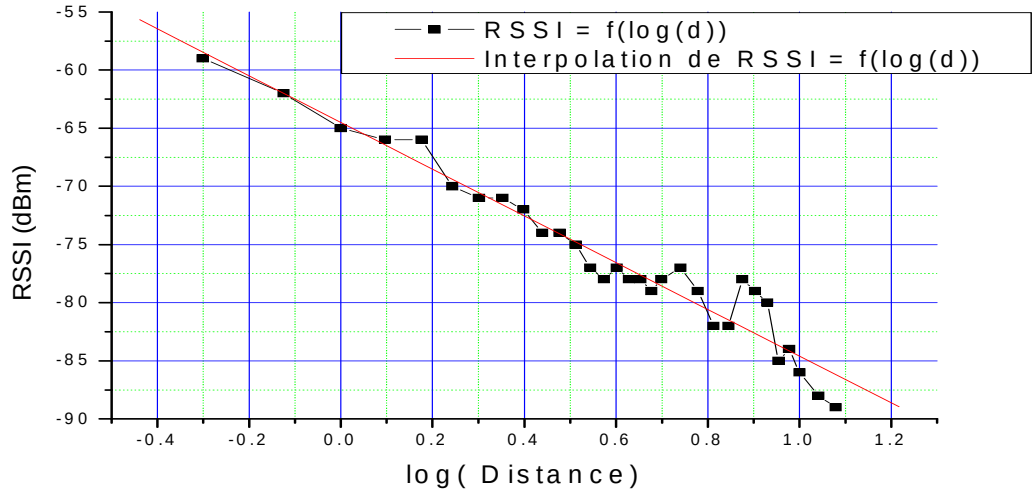


Figure 3.18: RSSI vs log(d) dans un couloir.

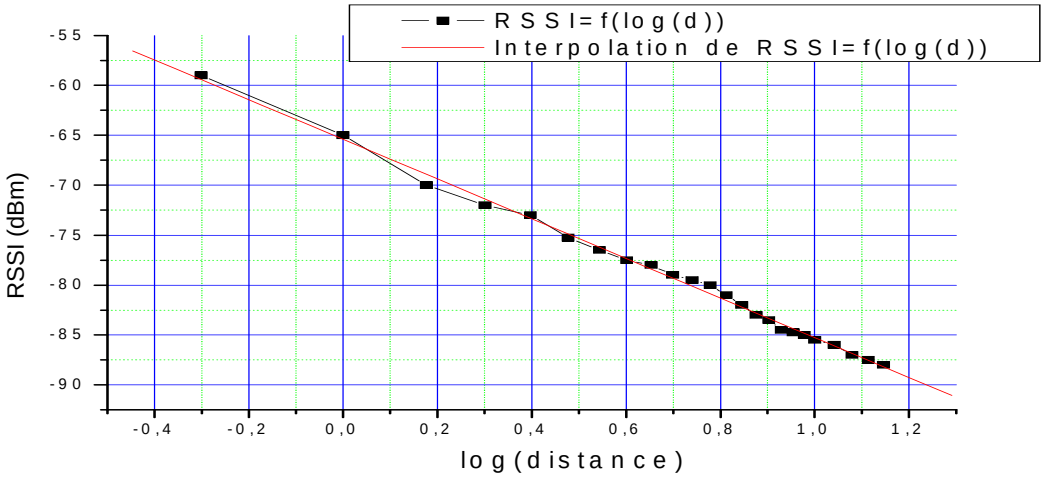


Figure 3.19: RSSI vs log(d) sur un terrain dégagé.

Tableau3.1 : Tableau récapitulatif des équations des *RSSI=f (d)* après linéarisation et interpolation.

Environnement de déploiement	*RSSI=f (log(d))* = A*log(d) + K *(dBm)*	ξ_A	ξ_K
Laboratoire	RSSI= -19,4192*log(d) -64,382	2,21106	1,16398
Couloir	RSSI= -20,0969*log(d) -64,503	0,86376	0,58267
Terrain dégagé sans obstacle	RSSI= -19,8803*log(d) - 65,399	0,2616	0,20

Tableau 3.2: Tableau récapitulatif des équations des distances *d(m) =f (RSSI).*

Environnement de déploiement	Distance d(m) =f (RSSI) $=10^{[\frac{K-RSSI}{A}]}$
Laboratoire	$d=f(RSSI)=10^{[\frac{-64,382\ -RSSI}{19.4192}]}$
Couloir	$d=f(RSSI)=10^{[\frac{-64,50307-RSSI}{20,09687}]}$
Terrain dégagé sans obstacle	$d=f(RSSI)=10^{[\frac{-65,56041-RSSI}{19,87938}]}$

3.3.2. Interprétation :

On constate que pour les trois environnements, le coefficient directeur de la droite trouvée est très proche de la valeur -20 ce qui veut dire que dans les environnements de l'expérimentation l'exposant de la perte de signal de propagation vaut n=2, donc on peut valider que le coefficient directeur de chaque droite trouvée est -20 et que les variations trouvées sur ce dernier d'un environnement à l'autre sont dues aux erreurs d'interpolation et aux phénomènes qui perturbent l'évaluation du RSSI cités précédemment.

D'après l'équation théorique du bilan de liaison entre un émetteur et un récepteur la constance K= $10\log\left[\left(\frac{\lambda}{4*\pi}\right)^2 GeGrPe\right]$: est la valeur du RSSI entre deux capteurs séparés d'une distance d=1mètre, elle dépend de la puissance d'émission, de la fréquence du signal et des gains des antennes qui sont constants et identiques pour tous les capteurs utilisés.

Un calcul théorique de la constante K nous a donné la même valeur trouvée pratiquement. Voir les figures (3.12 - 3.13 et 3.14) des RSSI=f (distance) pour les trois environnements. (au point de distance d=1 m le RSSI (d=1m)= -65 dBm).

Avec:

- $Ge = Gr = -5\ dBm$.
- $Pe = -15\ dBm.$
- $f = 2{,}4\ GHz.$ (canal 0)
- $K = -65\ dBm.$ C'est la valeur de la constante K trouvée théoriquement et pratiquement dans les trois environnements de l'expérimentation.

Donc :

RSSI= -20∗log(d) – 65 (dBm) (3.6) et **d =f(RSSI) =** $\mathbf{10}^{\left[\frac{-65-RSSI}{20}\right]}$ (m) (3.7)

Est le modèle trouvé de l'équation du bilan de liaison RSSI=f(d) pour les capteurs WSN 430 utilisés.

3.3.3. Conclusion 2:

L'exposant de la perte de signal de propagation vaut n=2, le coefficient directeur de chaque droite trouvée était bien -20 et la valeur de la constante K trouvée pratiquement est la même trouvée théoriquement à une distance d=1 mètre, c'est qui nous a permis de valider que les distances étaient bien issue d'une formule de type l'équation de bilan de liaison. Ainsi les graphes générés peuvent servir comme courbes standards qui peuvent êtres employées par un capteur récepteur à estimer la distance à laquelle un capteur émetteur est situé.

Les résultats pratiques confirment l'équation théorique du bilan de liaison entre un émetteur et un récepteur qu'on a posé comme hypothèse et les distances étaient bien issues d'une équation de ce type.

Ce modèle trouvé est en sorte de calibration des capteurs utilisés et peut être utilisé pour estimer les distances entre les capteurs qu'après son validation dans les trois environnements de l'expérimentation.

3.4. Validation du modèle de l'équation du bilan de liaison trouvé d=f (RSSI) :

Une comparaison entre les distances réelles et les distances estimées nous permis de valider et de donner une crédibilité au modèle trouvée de l'équation du bilan de liaison d= f(RSSI) à être utilisée pour le calcul des distances inter capteur dans un environnement donné.

3.4.1. L'évolution des distances estimées et réelles en fonction des RSSIs :

Pour chaque environnement, les distances sont estimées par le modèle de l'équation du bilan de liaison trouvé en fonction des valeurs des RSSIs évalués dans les expériences précédentes ensuite sont comparées aux distances réelles.

Les courbes suivantes montrent la différence entre les distances réelles est les distances estimées.

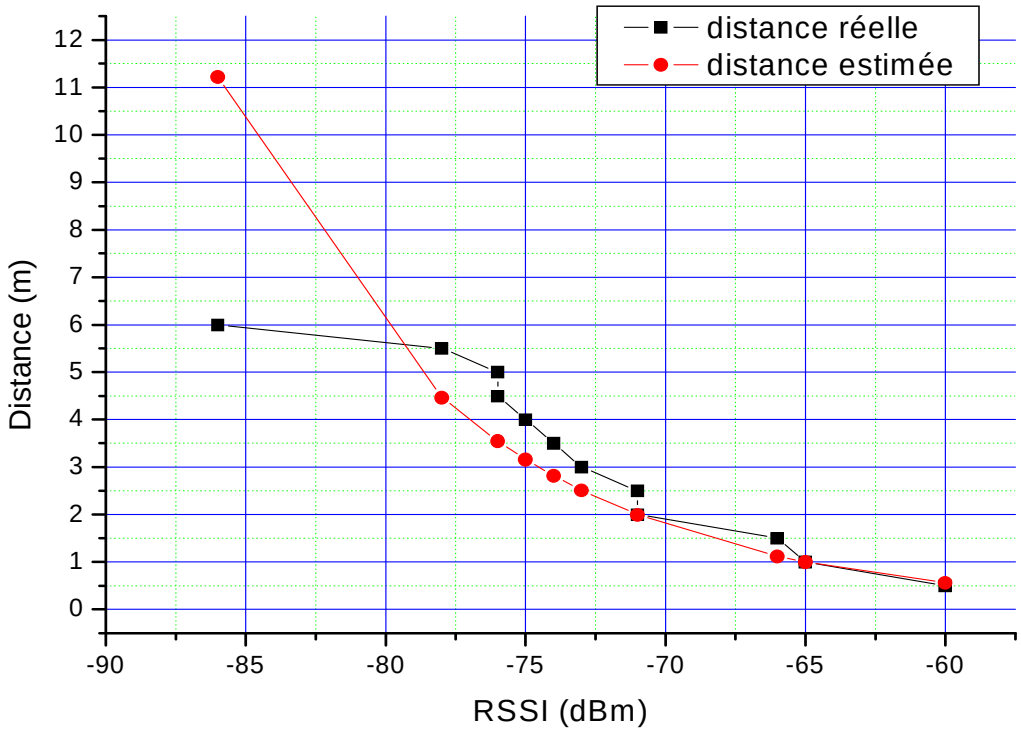


Figure 3.20: L'évolution des distances estimées et réelles en fonction du RSSI dans un laboratoire.

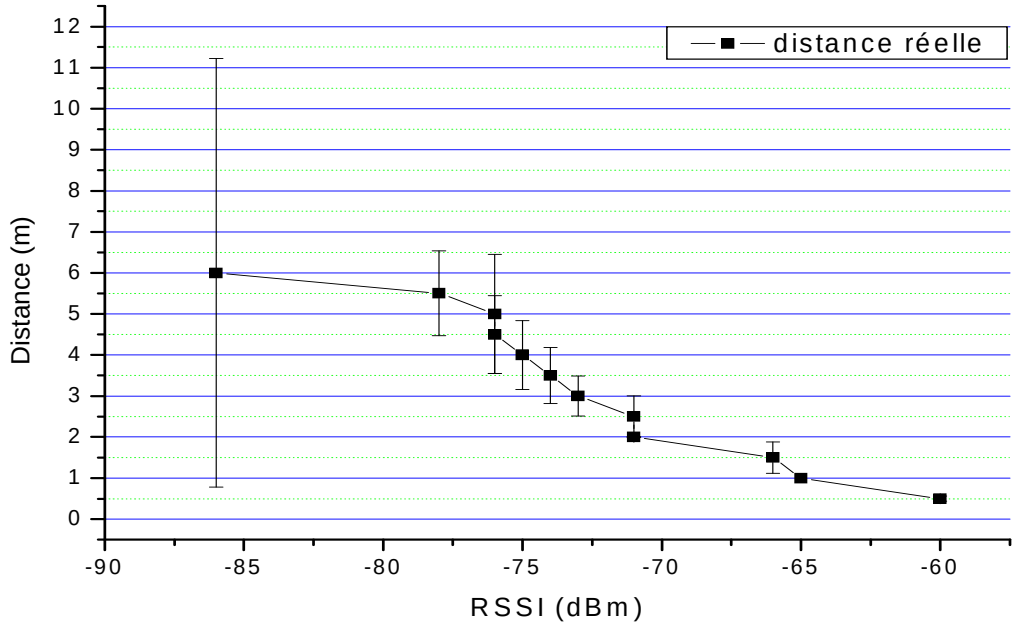


Figure 3.21: L'écart entre les distances estimées et les distances réelles dans un laboratoire.

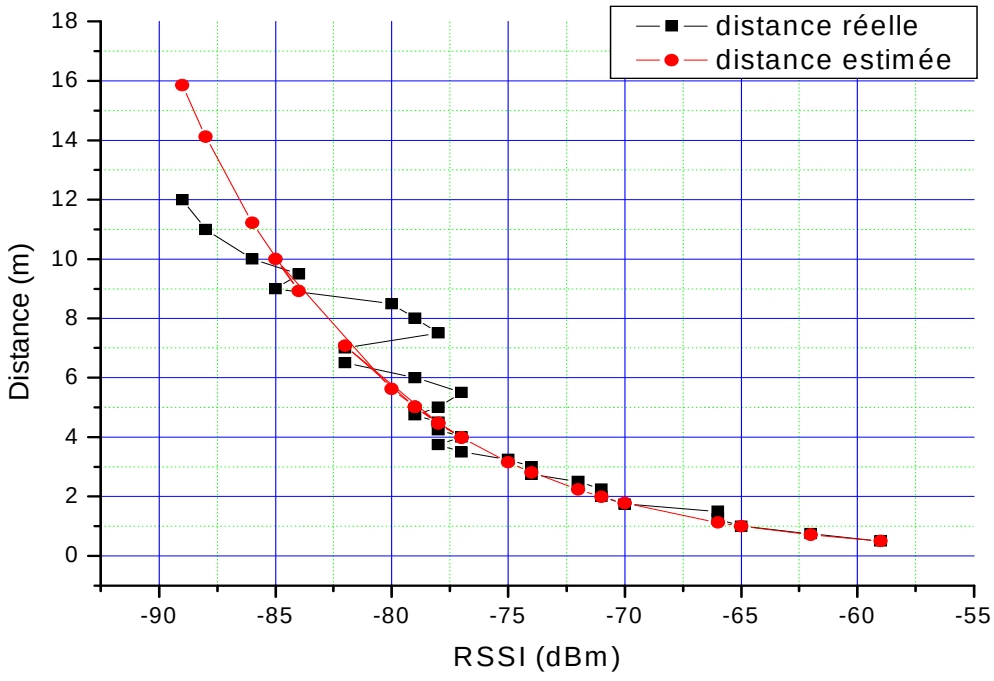


Figure 3.22: L'évolution des distances estimées et réelles en fonction du RSSI dans un couloir.

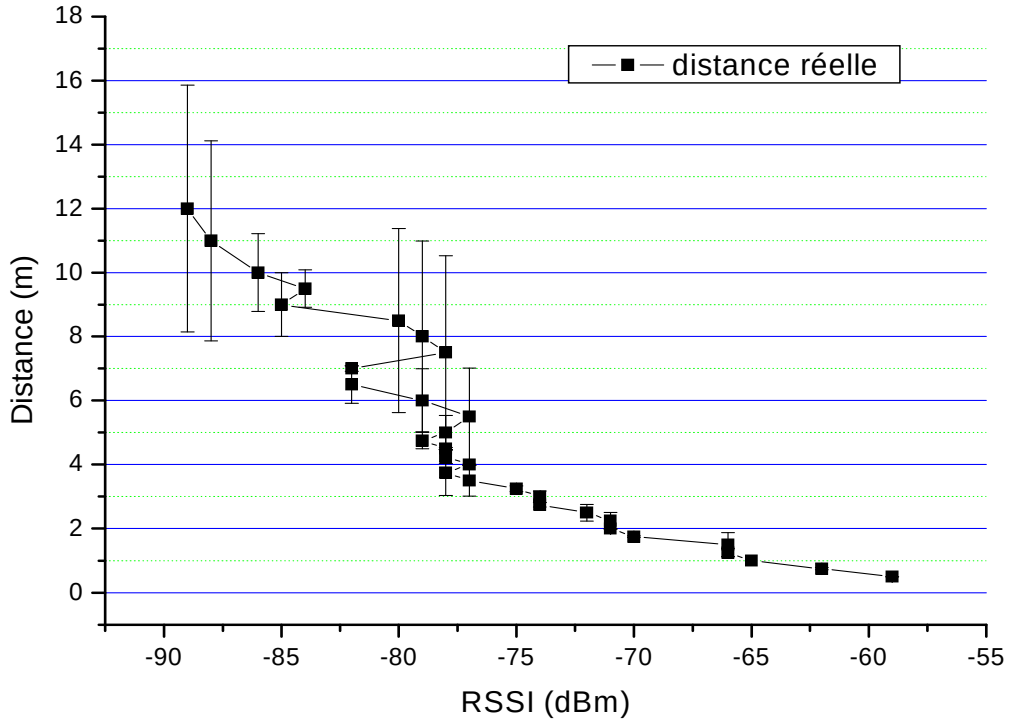


Figure 3.23: L'écart entre les distances estimées et les distances réelles dans un couloir.

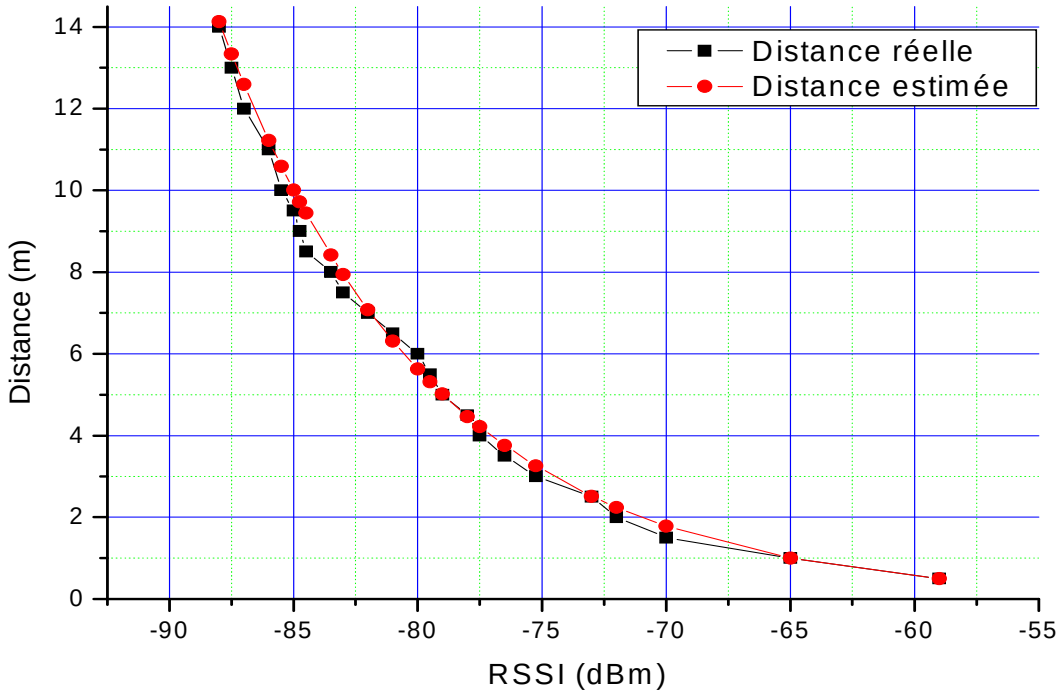


Figure 3.24: L'évolution des distances estimées et réelles en fonction du RSSI sur un terrain dégagé.

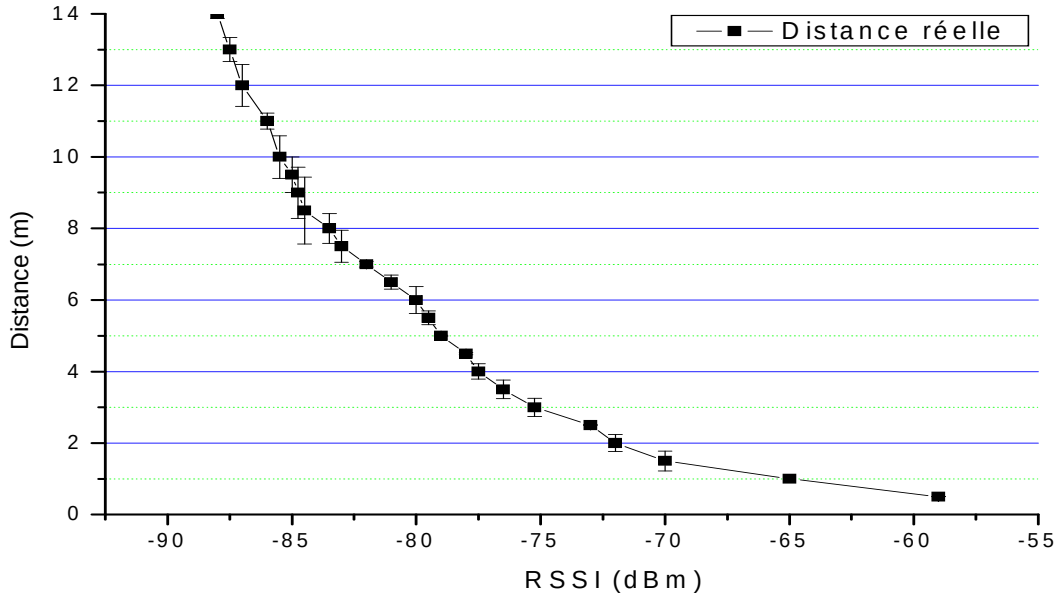


Figure 3.25: L'écart entre les distances estimées et les distances réelles sur un terrain dégagé.

3.4.2. Interprétation des résultats :

L'écart entre les distances estimées et les distances réelles est différent entre un environnement intérieur et un environnement extérieur. Cet écart est dû principalement à la variation et l'instabilité du RSSI causées par les phénomènes cités précédemment qui influés directement sur l'estimation de la distance entre deux capteurs.

- Dans un laboratoire il est bien clair que plus la distance entre deux capteurs augmente plus l'écart entre la distance estimée et la distance réelle augmente. Entre la distance d= 0,5 mètre et d= 2 mètre, l'écart connu une faible variation entre 0 mètre et 0,378 mètre, Au delà de d= 2 mètre il ya une augmentation de l'écart qui atteint les 5 mètres à la distance d=6 mètre. C'est un large écart par rapport à la distance réelle et est de l'ordre de grandeur des dimensions du laboratoire.

- Même chose que pour le laboratoire, dans un couloir l'écart pour les courts distance connu une faible variation jusqu'à une distance d=5 mètre, la variation de l'écart est entre 0 mètre et 0,71 mètre, au-delà du cinquième mètre (d=5m) jusqu'à d=12 mètre il ya une volatilité de l'écart entre le 0,5 mètre et les 4 mètres, c'est un grand écart par rapport à la distance réelle. car plus la distance augmente entre les deux capteurs plus le RSSI devient instable vu les phénomènes cités auparavant qui influes sur ce dernier comme le phénomène de multi-trajet qui peut

engendre des signaux qui peuvent être destructifs et affaiblir la puissance reçue lors de la réception d'un paquet et la distance estimée sera grande par rapport à la distance réelle, ou, à l'inverse, des signaux constructifs qui augmentent la puissance reçue et l'estimation sera une distance très faible par rapport à la distance réelle.

- A' l'extérieur, sur un terrain dégagé, l'écart entre les distances estimées et les distances réelles est faible et stable sur tous le parcours de mesure et connu de faible variation par rapport à l'écart enregistré dans le laboratoire et le dans le couloir. Entre la distance d= 0,5 mètre et d= 7 mètres, il ya un très faible écart qui varie entre les 0,001 mètres et les 0,27 mètres, entre les 7,5 mètres et 14 mètres il varie entre les 0,12 mètres et 0,94 mètres et c'est le seule point critique qui a été enregistré à la distance d=8,5 mètres qui s'explique par une faiblesse de puissance causée par un rayonnement non isotrope de l'antenne malgré l'absence de dynamique dans le réseau et des conditions particulièrement favorables.

3.4.3. Conclusion 3:

Le comportement du RSSI à l'intérieur est différent à celle de l'extérieur ce qui provoque à une influence directe sur l'estimation des distances entre les capteurs.

A l'intérieur, le RSSI est peut stable pour les très courtes distances et instable pour les longues distances ce qui provoque un large écart entre les distances estimées et les distances réelles.

A l'extérieur, Le RSSI est stable sur tous le parcours de mesure donc un écart faible entre la distance estimée et la distance réelle.

Vu l'influence des phénomènes cités précédemment sur le RSSI à l'intérieur d'un bâtiment, même pour les très courtes distances on peut risquer à avoir une atténuation ou une augmentation brusque de la puissance reçue qui sera traduit par une male estimation de la distance entre deux capteurs et ces conditions ne nous encourage pas à utiliser le modèle de l'équation trouvée pour estimer la distance entre deux capteurs à l'intérieur d'un bâtiment.

Le milieu « terrain dégagé » est particulièrement favorable : espace ouvert et pas de mobilité à l'intérieur du réseau et ces caractéristiques entraînent une meilleure propagation du signal avec de moins fortes conséquences du multi-trajet donc un faible écart entre les distances réelles et celles estimées.

Le modèle de L'équation du bilan de liaison entre un émetteur et un récepteur est fiable à l'extérieur d'un bâtiment où le RSSI peut être considérer comme métrique pour l'estimation de la distance entre deux capteurs à porté radio. Néanmoins les changements climatiques et les conditions atmosphériques peuvent influer sur le RSSI et perturber l'estimation des distances.

3.5. Application du modèle de l'équation trouvé à la localisation dans les WSNs:

Malgré l'impossibilité de considérer le RSSI comme métrique pour la localisation des capteurs à l'intérieur d'un bâtiment, on va appliquer le modèle trouvé avec la contribution des algorithmes de triangulation et de multilatération (détaillés dans le chapitre 2) qui seront traduits par un programme sous MATLAB pour la localisation des capteurs dans les trois environnements et à différents distances afin de comparer la précision de la localisation d'un capteur dans chaque environnement et confirmer l'inutilité du modèle de l'équation du bilan de liaison à l'intérieur d'un bâtiment.

3.5.1. L'ordre chronologique de la localisation :

- Installer les trois capteurs ancres C_1, C_2 et C_3 qui forment la base de repère dont on connu les coordonnées et la position de chacun d'eux.
- Déployer un (des) capteur *i* quelconque dans le réseau afin de le localiser et estimer ces coordonnées.
- S'assurer à l'aide de la carte relative du réseau WSN que tous les capteurs sont à porté radio dans le réseau.
- Evaluer les trois valeurs des RSSIs entre chaque capteur ancre et le capteur *i* à estimer sa position.
- Traduire les RSSIs obtenus en distances par l'équation du bilan de liaison d=f(RSSI).
- Tracer les trois cercles (chacun de centre la position du capteur ancre et de rayon la distance qui le sépare du capteur *i* à estimer sa position).

L'intersection des trois cercles est la position estimée $\hat{X}$ du capteur *i* où ces coordonnées seront calculées par la Multilatiration.

Soient C_1, C_2 et C_3 les trois capteurs ancres qui forme la base de repère ont respectivement les coordonnées (x_1, y_1), (x_2, y_2) et (x_3, y_3) et d_1, d_2 et d_3 sont les distances estimées par l'équation d=f(RSSI) entre chaque capteur ancre et le capteur *i* a estimé sa position.

On trace les trois cercles de centres C_1, C_2 et C_3 et de rayons d_1, d_2 et d_3 afin d'estimer la position ou la zone d'appartenance du capteur *i*.

Par multilatération on calcul les coordonnées estimées du capteur *i* on résolvant le système d'équation des trois cercles suivant:

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

$\hat{X}= (\hat{x} ; \hat{y})$: est la solution du système d'équation et sont Les coordonnées estimées de la position du capteur *i,* on compare sa position estimée à sa position réelle $X=(x_0 ; y_0)$ on sortant par une borne d'erreur sur ses coordonnées (x; y).

L'erreur sur les coordonnées estimées du capteur *i* est:

$$\Delta x = \pm |\hat{x} - x_0| \quad \text{et} \quad \Delta y = \pm |\hat{y} - y_0|$$

La précision de la position estimée $\hat{X}$ du capteur par rapport à sa position réelle X est :

$$\|\hat{X} - X\| = \sqrt{(\hat{x} - x_0)^2 + (\hat{y} - y_0)^2} \qquad (3.8)$$

Dans les réseaux de capteurs on cherche a minimisé la fonction d'optimisation donnée par l'équation (2.1) : [VAN 07]

Pour rappel :

Soit $\hat{x}_i$ la position estimée du nœud *i* obtenue par une certaine méthode de localisation, l'estimation de l'erreur de localisation de position est donnée par l'équation (2.4) [VAN 07]

Pour quantifier la précision dans les différentes environnements ou des différentes méthodes, nous utilisons la RMSE (Root Mean Square Error, en français : racine de l'erreur quadratique moyenne). C'est l'erreur du modèle d'estimation des distances.

la RMSE entre les distances estimées $\hat{d}_{ij}$ et les distances réelles d_{ij} est donnée par l'équation (2.3) [VAN 07]

Pour le calcul de la RMSE il faut calculer la différence entre les distances estimées et les distances réelles de tous les couples de capteurs (*i*,*j*) dans le réseau.

Les distances manquantes peuvent êtres calculées géométriquement ou estimées par lien radio.

Le capteur déjà localisé devient une ancre et peut contribuer à la localisation des autres capteurs dans le réseau on prenant on compte l'estimation de l'erreur sur sa position E_{RMSE}^{pos} pour faire des corrections sur la position des autres capteurs localisés à base de celle de ce dernier.

3.5.2. Résultats de La localisation des capteurs dans les trois environnements:

Utilisant l'équation du bilan de liaison trouvée d=f(RSSI) et un programme écris sous MATLAB qui calcule les distances et exécute les deux algorithmes de triangulation et de multilatération pour la localisation de trois capteurs T, W et Z à l'aide d'une base de repère formée par trois autres capteurs ancres C_1, C_2 et C_3 dont on connu leurs coordonnées. (En annexe E vous trouvez le code source du programme nommée localisation_wsn.m qui réalise l'opération de localisation).

Le programme converti les RSSIs en distances, trace les cercles, montre la zone d'appartenance du capteur à estimer sa position et calcule les coordonnées de ce dernier.

L'opération de la localisation est réalisée avec un réseau de six (6) capteurs dans les trois environnements étudiés afin de pouvoir comparer la précision de la localisation dans un environnement par rapport à un autre et à différentes positions des capteurs et confirmer l'inutilité du modèle à l'intérieur d'un bâtiment.

N = 6 capteurs ; m = 3 capteurs ancres ; (N-m) = 3 capteurs cibles à estimer leurs positions.
Nous avons intérêt à trouver pour chaque environnement:

- La fonction d'optimisation des positions.
- l'estimation de l'erreur de localisation.
- la RMSE entre les distances estimées $\hat{d}_{ij}$ et les distances réelles d_{ij}.

A. Résultats de la localisation des capteurs dans un laboratoire :

On affecte aux capteurs ancres les coordonnées suivantes : $C_1(0,0)$; $C_2(6,0)$ et $C_3(0,4)$. Les coordonnées réelles des capteurs T, W et Z supposées inconnues sont :
T(2,2) ; W(4,3) et Z(6,4).

Tableau 3.3: Résultat de localisation du capteur T(2,2) dans un laboratoire.

capteurs	RSSI (dBm)	Distances(m) d =f(RSSI)				
C_1 - T	-73	2.511	$\hat{T}$ ($\hat{x}$; $\hat{y}$)	Δx(m)	Δy(m)	$\|\hat{T} - T\|$ (m)
C_2 - T	-79	5.011	(1.433; 1.904)	0.568	0.096	0.576
C_3 - T	-73.5	2.660				

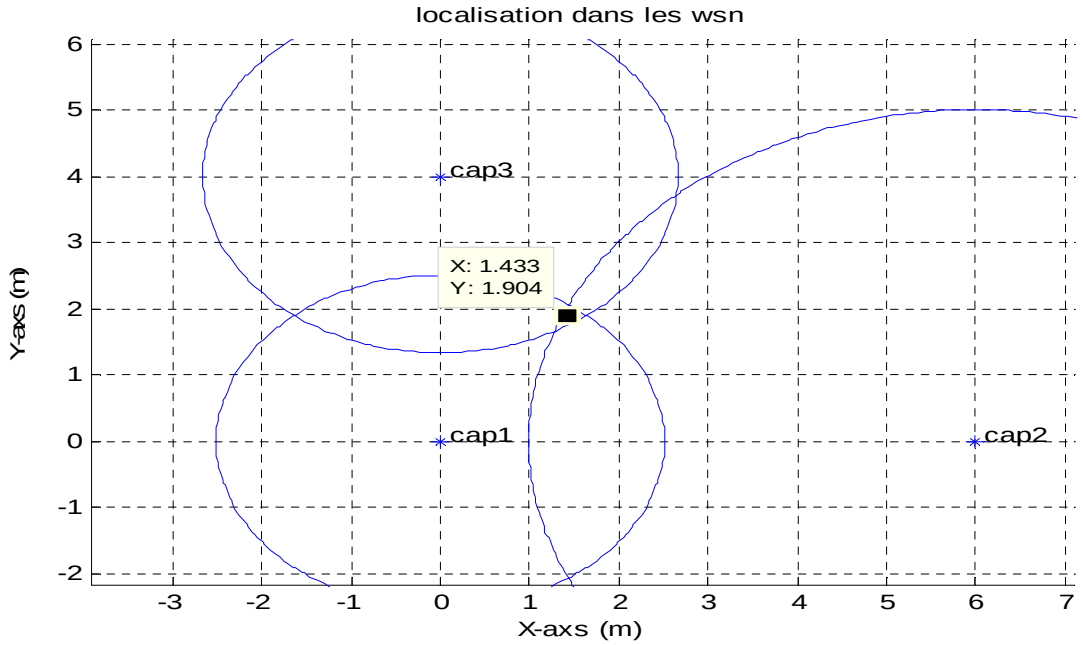


Figure 3.26: Estimation de la position du capteur T(2,2) dans un laboratoire.

Tableau 3.4: Résultat de localisation du capteur W(4,3) dans un laboratoire.

capteurs	RSSI (dBm)	Distances(m) d =f(RSSI)				
C_1 - W	-77	3.98	$\widehat{W}$ (x̂ ; ŷ) (m)	Δx (m)	Δy (m)	$\|\widehat{w} - w\|$ (m)
C_2 - W	-73.5	2.660	(3.730; 2.730)	0.270	0.270	0.382
C_3 - W	-75	3.162				

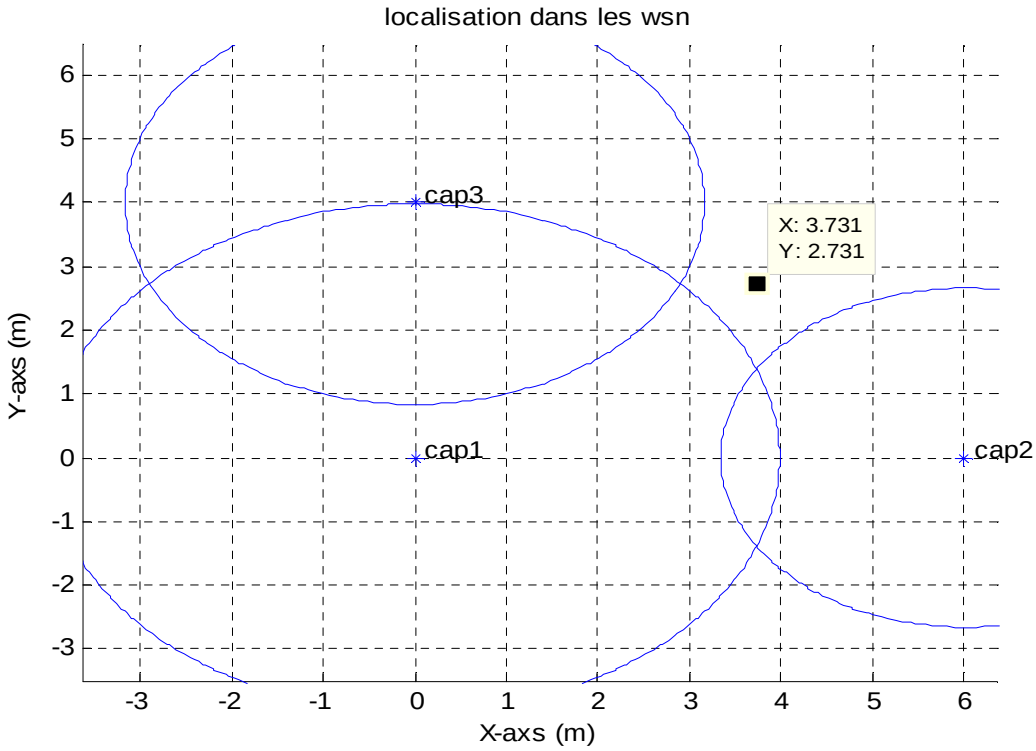


Figure 3.27: Estimation de la position du capteur W(4,3) dans un laboratoire.

Tableau 3.5: Résultat de localisation du capteur Z(6,4) dans un laboratoire.

capteurs	RSSI (dBm)	Distances(m) d =f(RSSI)				
C_1 - Z	-85.5	10.592	$\hat{Z}$ (x̂ ; ŷ) (m)	Δx (m)	Δy (m)	$\|\hat{Z} - Z\|$ (m)
C_2 - Z	-75	3.162	(11.516;6.095)	5.516	2.095	5.899
C_3 - Z	-84	8.912				

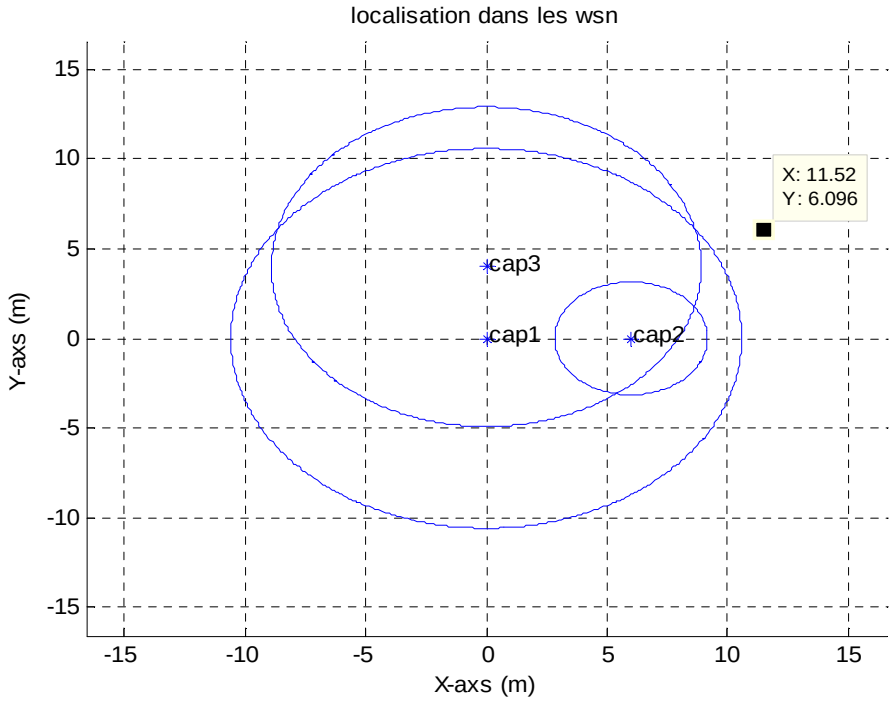


Figure 3.28: Estimation de la position du capteur Z(6,4) dans un laboratoire.

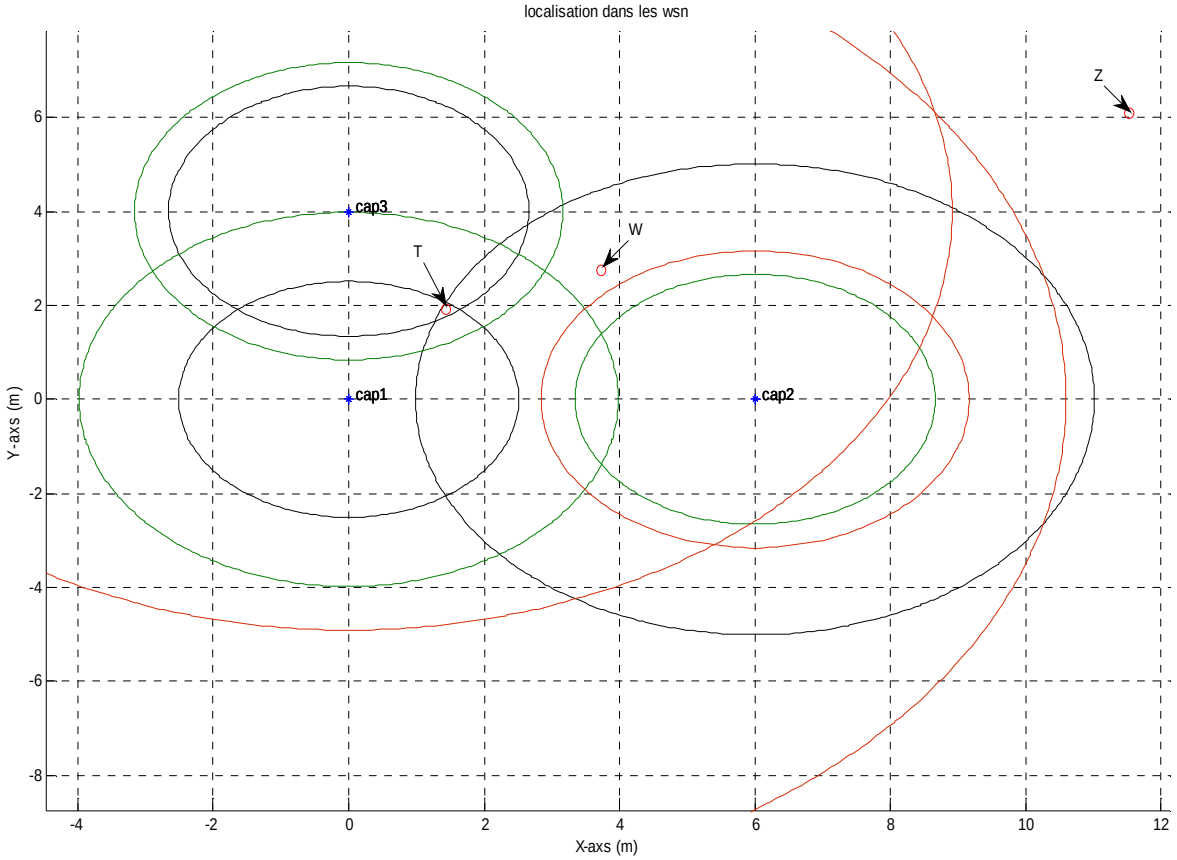


Figure 3.29: Estimation des positions des capteurs T, W et Z dans un laboratoire.

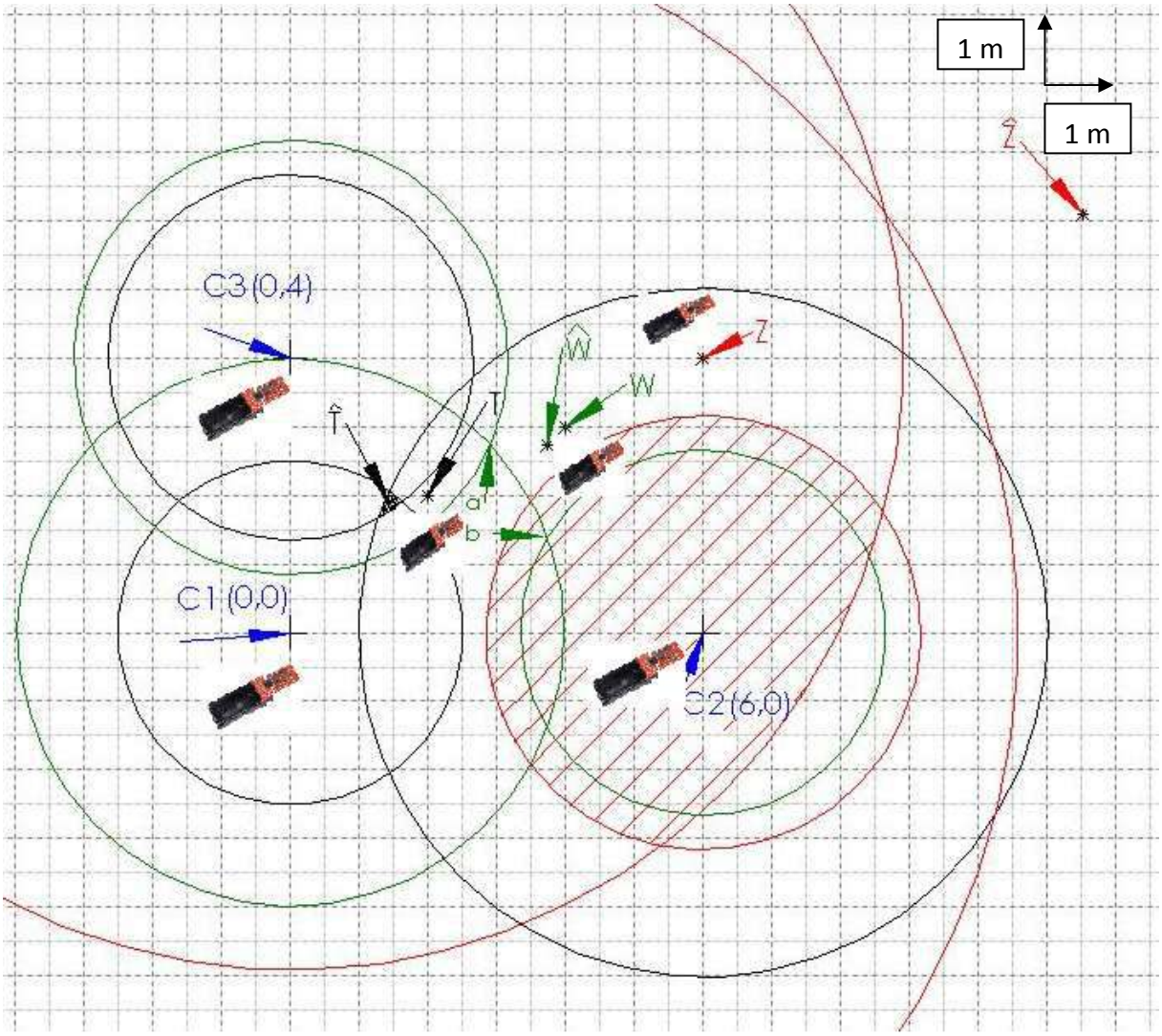


Figure 3.30 : Positions réelles et estimées des capteurs dans un laboratoire.

B. Résultats de la localisation des capteurs dans un couloir :

On affecte aux capteurs ancres les coordonnées suivantes : $C_1(0,0)$; $C_2(10,0)$ et $C_3(0,6)$.

Les coordonnées réelles des capteurs T, W et Z supposées inconnues sont : T(2,2) ; W(5,5) et Z(10,6).

Tableau 3.6: Résultat de localisation du capteur T(2,2) dans un couloir.

capteurs	RSSI (dBm)	Distances(m) d =f(RSSI)				
C_1 - T	-73.75	2.738	$\hat{T}$ ($\hat{x}$; $\hat{y}$)	Δx(m)	Δy(m)	$\|\hat{T} - T\|$ (m)
C_2 - T	-84.25	9.173	(1.167; 1.532)	0.833	0.468	0.955
C_3 - T	-79	5.011				

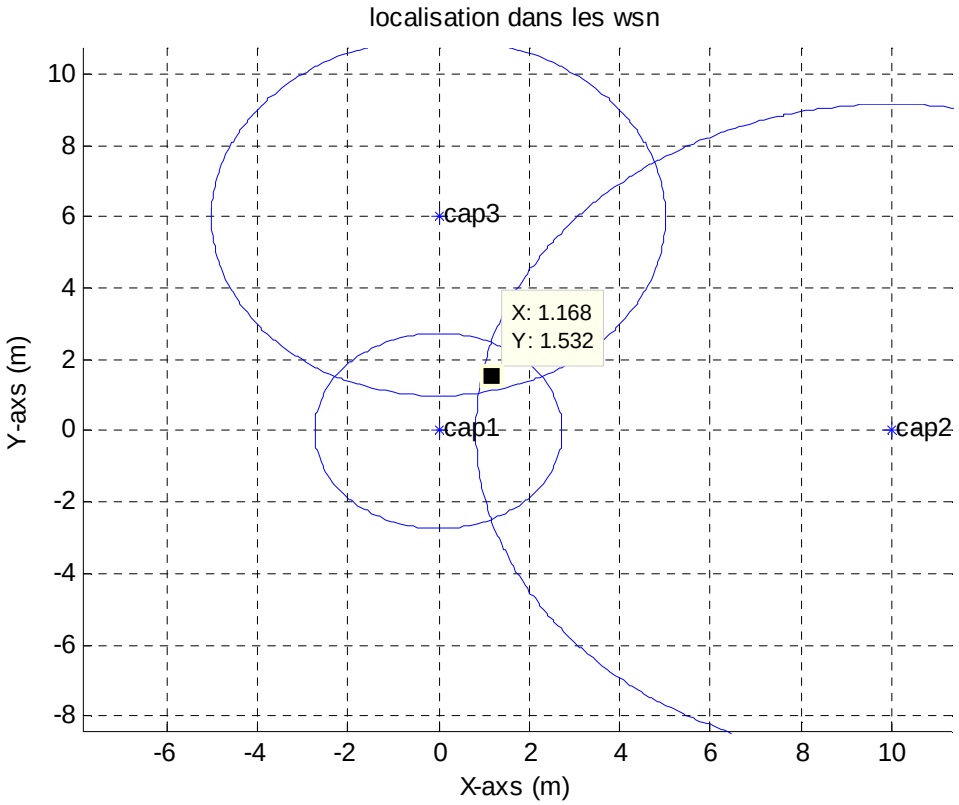


Figure 3.31 : Estimation de la position du capteur T(2,2) dans un couloir.

Tableau 3.7: Résultat de localisation du capteur W(5,5) dans un couloir.

capteurs	RSSI (dBm)	Distances(m) d =f(RSSI)				
C_1 - W	-82.5	7.498	$\widehat{W}$ (x̂ ; ŷ) (m)	Δx (m)	Δy (m)	$\|\widehat{w} - w\|$ (m)
C_2 - W	-82.25	7.286	(5.157; 5.337)	0.157	0.337	0.372
C_3 - W	-79.5	5.308				

Tableau 3.8: Résultat de localisation du capteur Z(10,6) dans un couloir.

capteurs	RSSI (dBm)	Distances(m) d =f(RSSI)				
C_1 - Z	-87	12.589	$\hat{Z}$ (x̂ ; ŷ) (m)	Δx (m)	Δy (m)	$\|\hat{Z} - Z\|$ (m)
C_2 - Z	-81	6.309	(10.930;5.716)	0.930	0.280	0.972
C_3 - Z	-86	11.220				

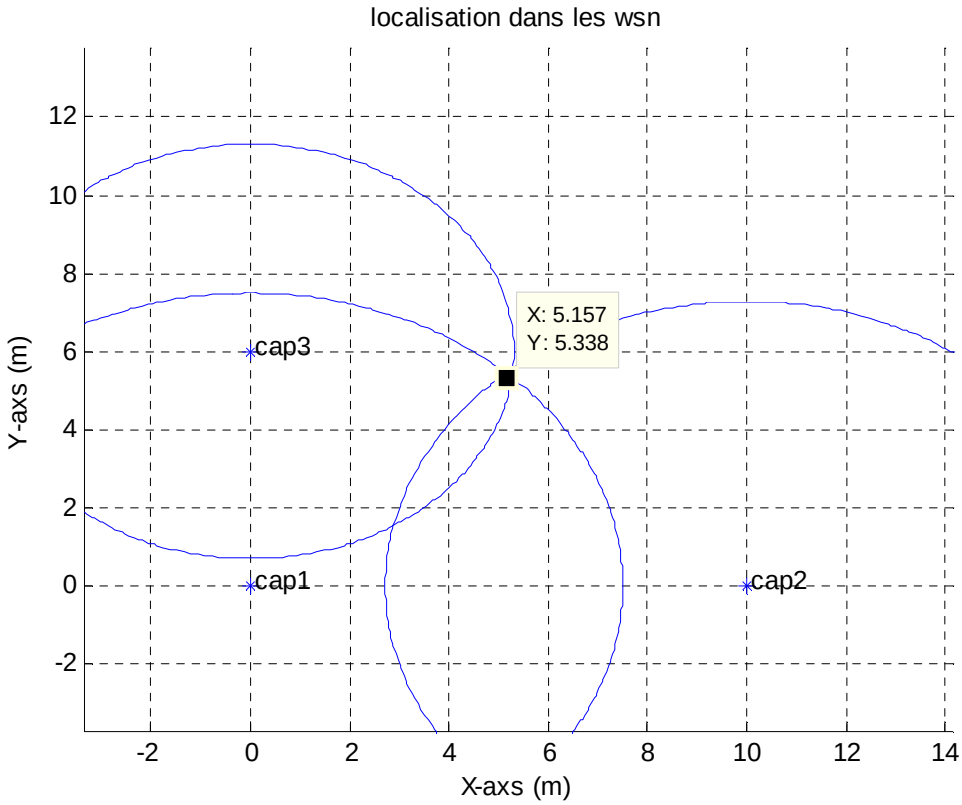


Figure 3.32: Estimation de la position du capteur W(5,5) dans un couloir.

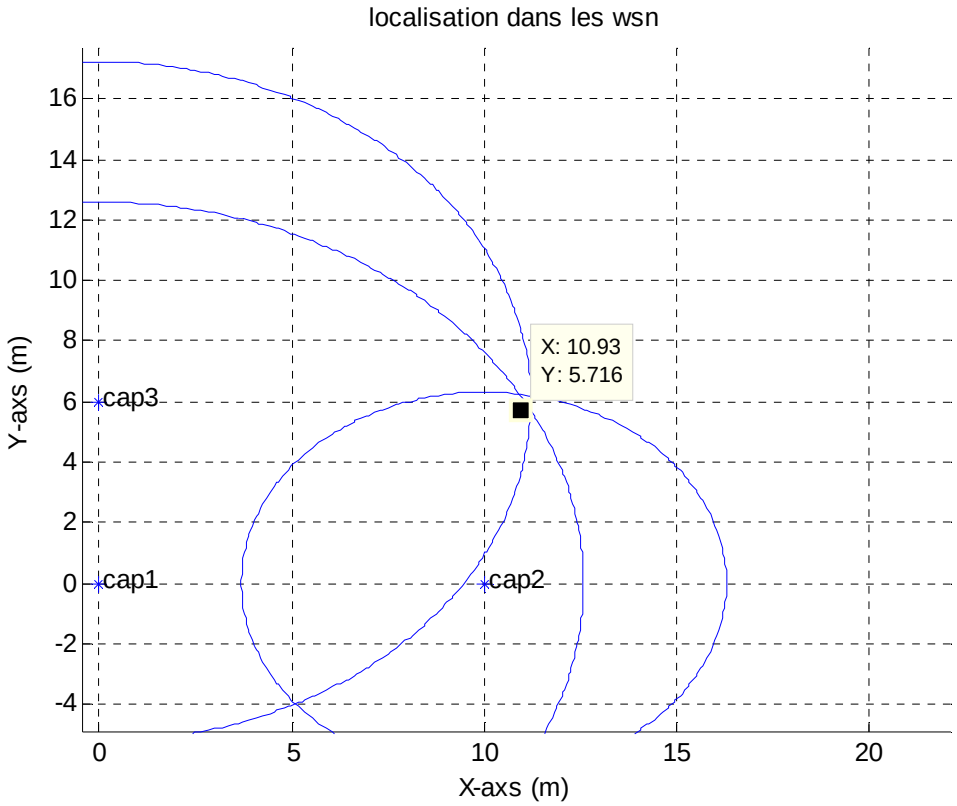


Figure 3.33: Estimation de la position du capteur Z(10,6) dans un couloir.

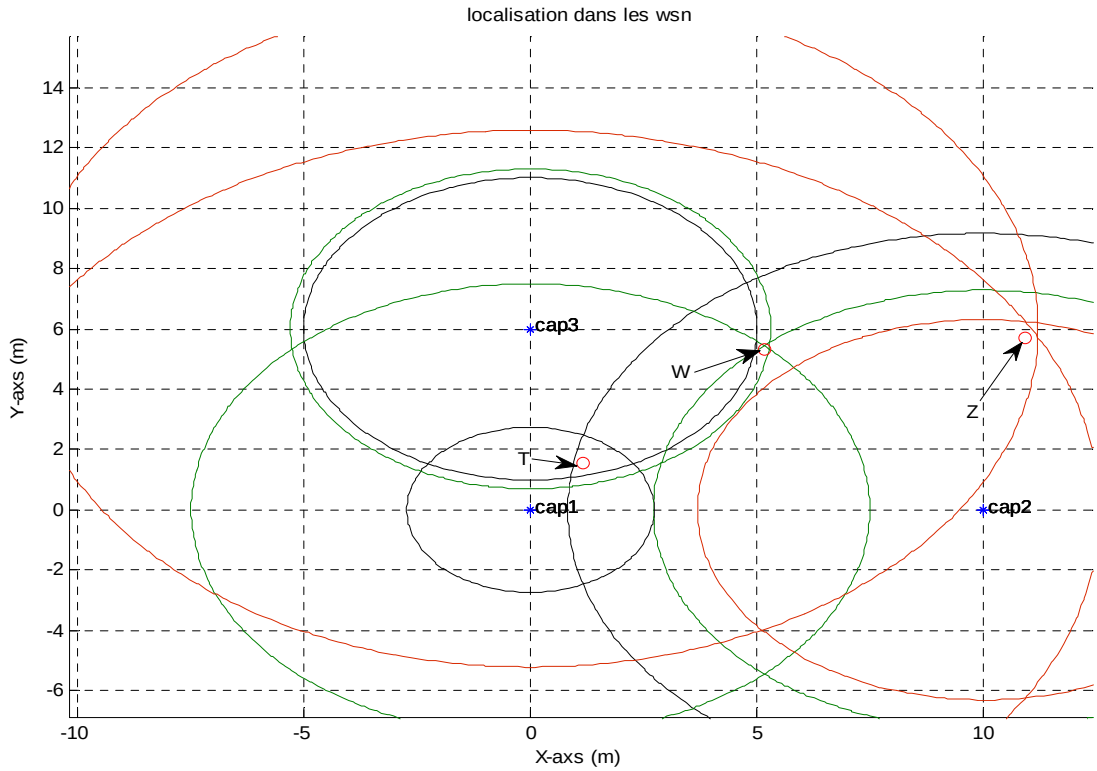


Figure 3.34: Estimation des positions des capteurs T, W et Z dans un couloir.

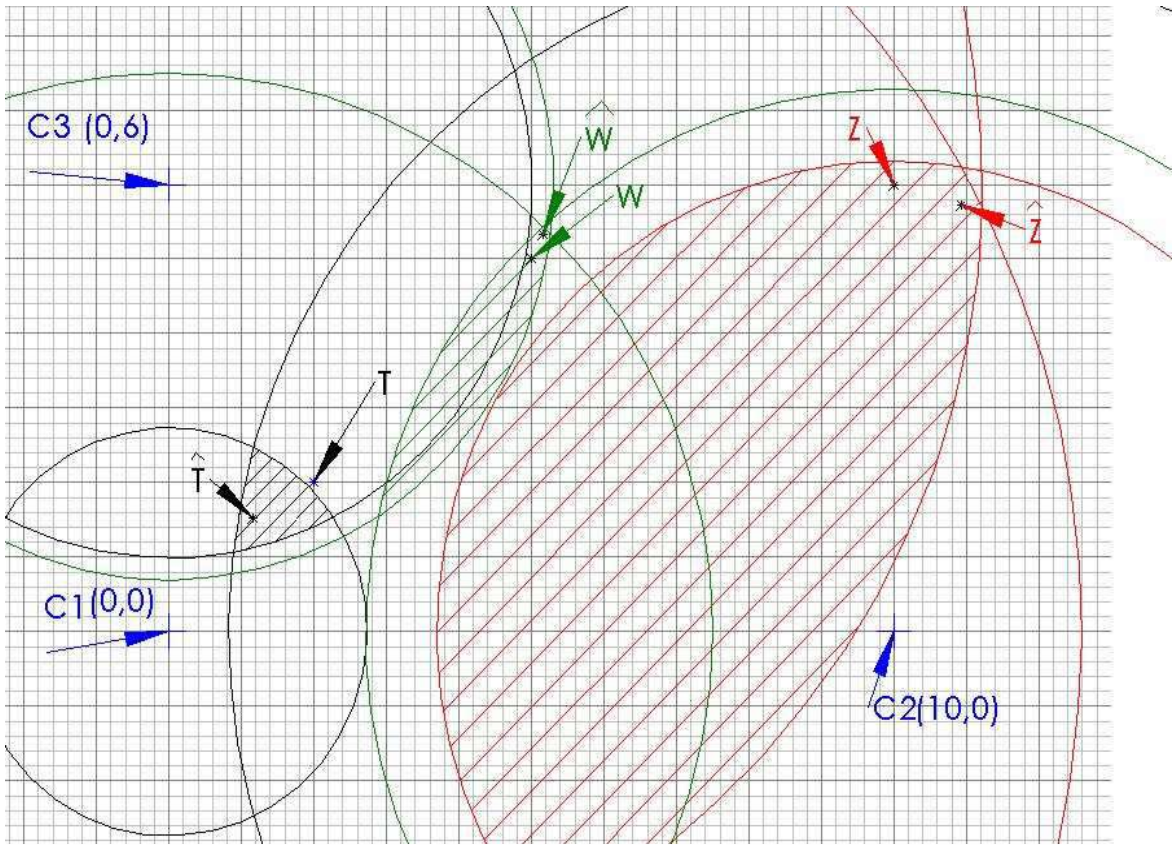


Figure 3.35 : Positions réelles et estimées des capteurs dans un couloir.

C. Résultats de la localisation des capteurs sur un terrain dégagé :

On affecte aux capteurs ancres les coordonnées suivantes : $C_1(0,0)$; $C_2(12,0)$ et $C_3(0,12)$.

Les coordonnées réelles des capteurs T, W et Z supposées inconnues sont : T(5,5) ; W(10,5) et Z(5,10).

Tableau 3.9: Résultat de localisation du capteur T(5,5) sur un terrain dégagé.

capteurs	RSSI (dBm)	Distances(m) d =f(RSSI)				
C_1 - T	-82.25	7.286	$\hat{T}$ ($\hat{x}$; $\hat{y}$)	Δx(m)	Δy(m)	$\|\hat{T} - T\|$ (m)
C_2 - T	-83.75	8.659	(5.087; 5.262)	0.087	0.262	0.276
C_3 - T	-83.5	8.414				

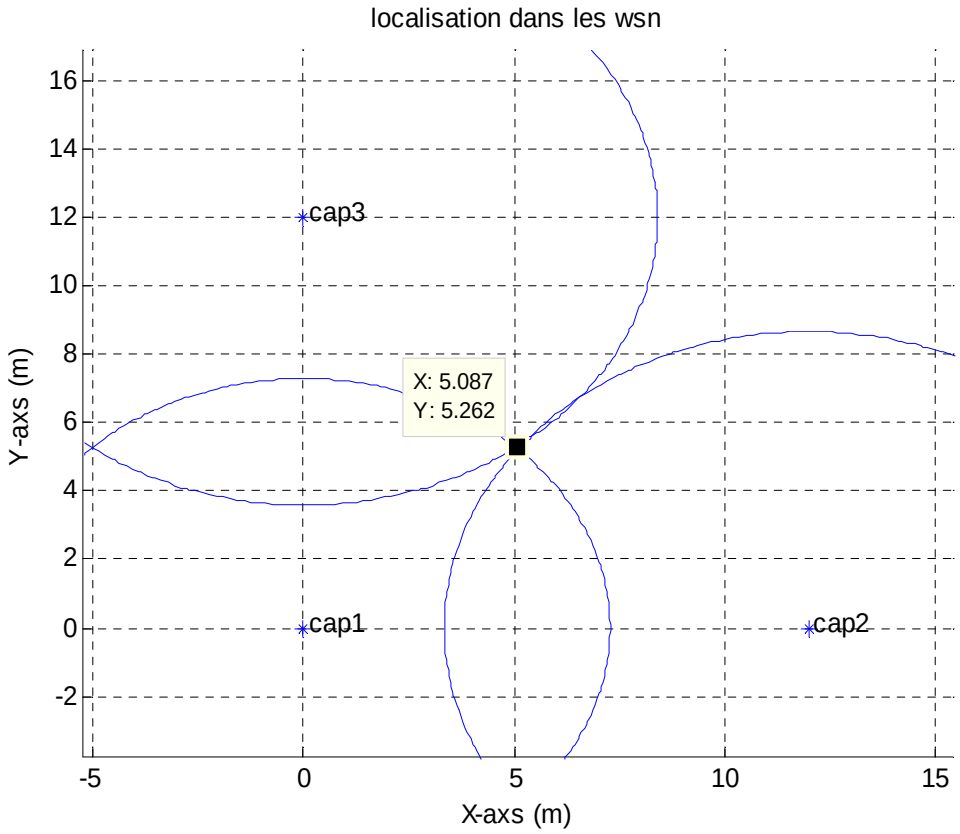


Figure 3.36: Estimation de la position du capteur T(5,5) sur un terrain dégagé.

Tableau 3.10: Résultat de localisation du capteur W(10,5) sur un terrain dégagé.

.

capteurs	RSSI (dBm)	Distances(m) d =f(RSSI)				
C_1 - W	-86	11.220	$\widehat{W}$ (x̂ ; ŷ)(m)	Δx(m)	Δy (m)	$\|\|\widehat{w} - w\|\|$(m)
C_2 - W	-79.5	5.309	(10.071;4.642)	0.071	0.358	0.365
C_3 - W	-87	12.589				

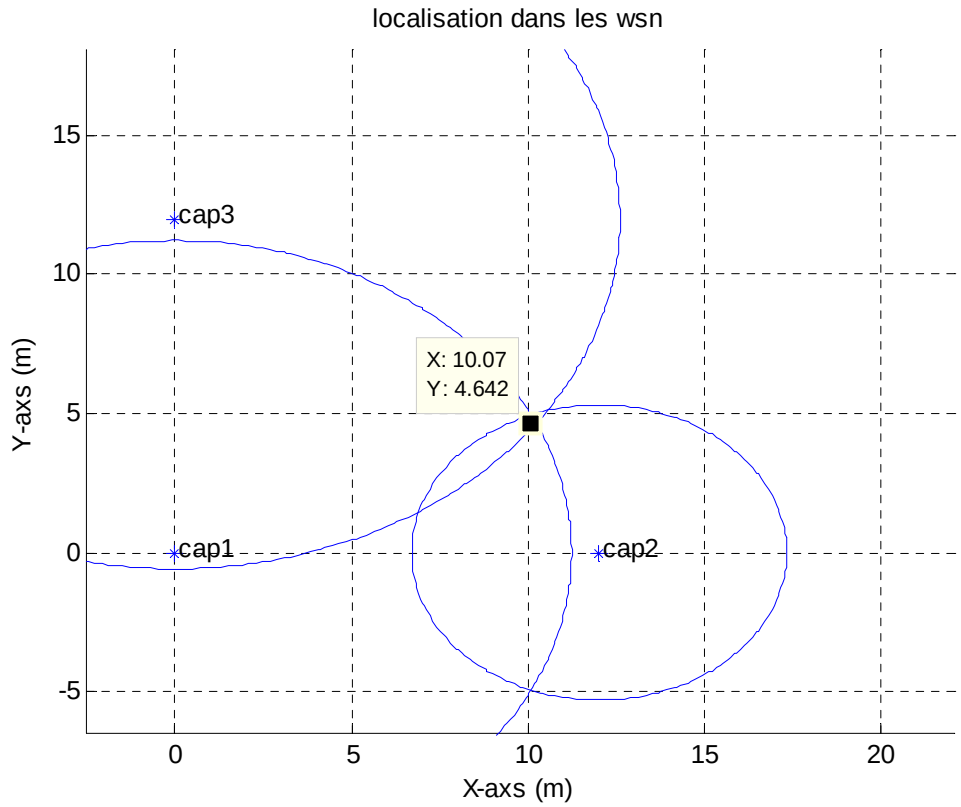


Figure 3.37: Estimation de la position du capteur W(10,5) sur un terrain dégagé.

Tableau 3.11: Résultat de localisation du capteur Z(5,10) sur un terrain dégagé.

.

capteurs	RSSI (dBm)	Distances(m) d =f(RSSI)				
C_1 - Z	-86.25	11.548	$\hat{Z}$ (x̂ ; ŷ) (m)	Δx (m)	Δy (m)	$\|\|\hat{Z} - Z\|\|$ (m)
C_2 - Z	-87	12.589	(4.953;10.240)	0.047	0.240	0.244
C_3 - Z	-80	5.622				

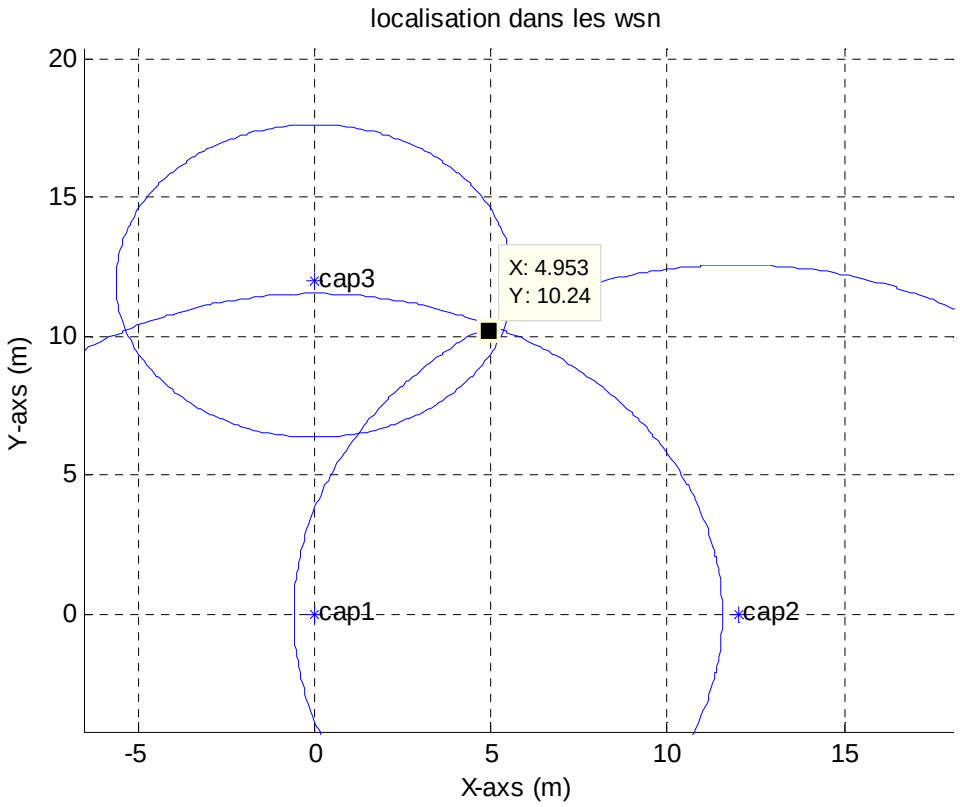
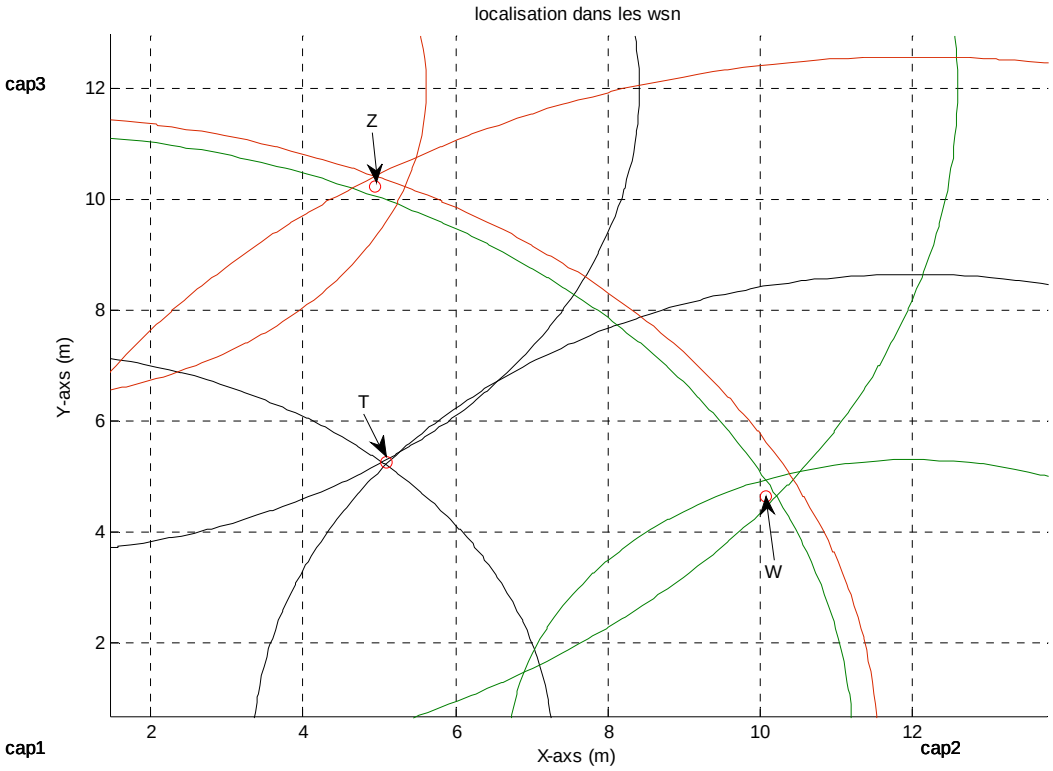


Figure 3.38: Estimation de la position du capteur Z(5,10) sur un terrain dégagé.



3.39: Estimation des positions des capteurs T, W et Z sur un terrain dégagé.

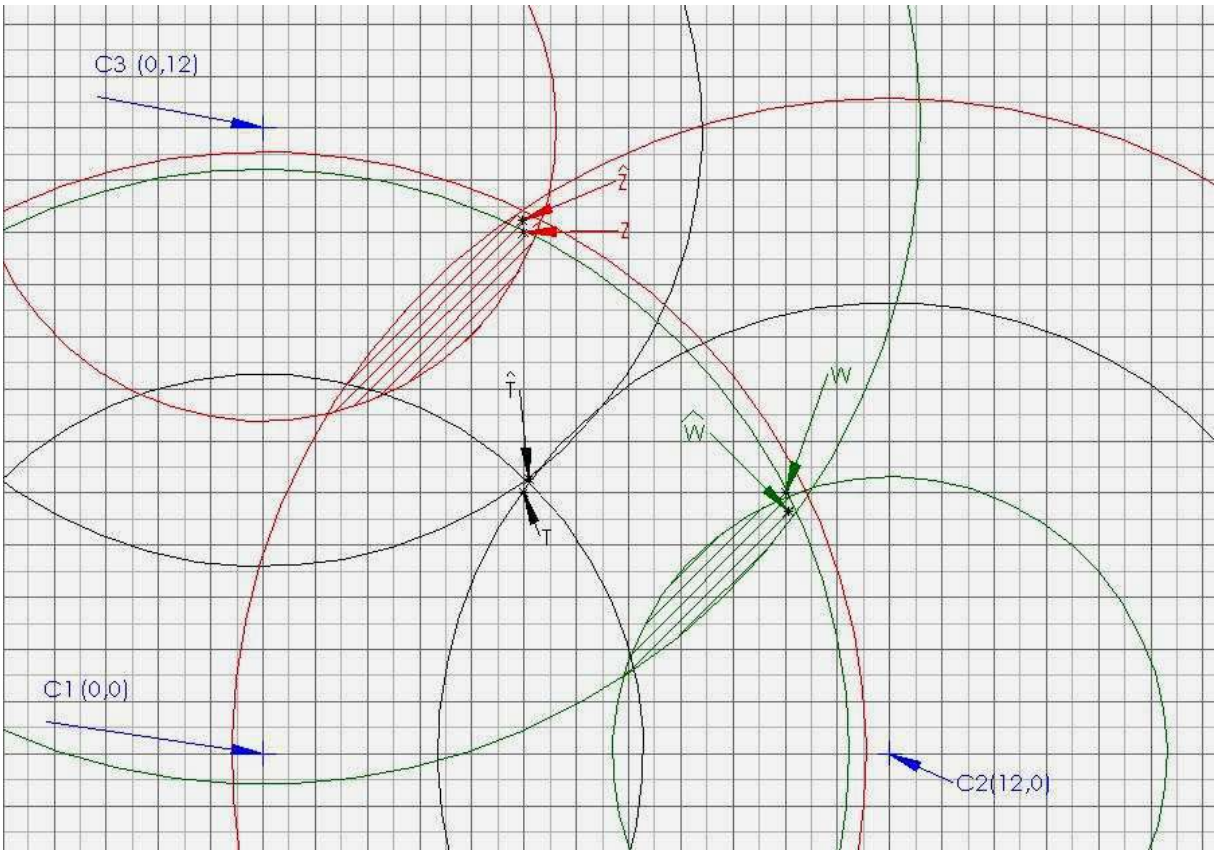


Figure3.40: Positions réelles et estimées des capteurs sur un terrain dégagé.

Tableau 3.12: récapitulation des résultats de localisation dans les trois environnements.

Environnement	Laboratoire (Intérieur)	Couloir (Intérieur)	Terrain dégagé (Extérieur)
$J_1(\hat{x})$ (m)	6,857	2,299	0,885
E_{RMSE}^{dist} (m)	5,305	2,190	0,468
E_{RMSE}^{pos} (m)	3,429	0,815	0,299

3.5.3. Interprétation des résultats de localisation :

D'après les résultats obtenus on constate bien que la précision d'estimation des distances et des positions est meilleure à l'extérieur qu'à l'intérieur d'un bâtiment.

Dans un laboratoire de 8 mètre de longueur et 6 mètre de largeur, une estimation d'erreur de 5 mètre sur l'estimation de la distance et une estimation d'erreur de 3,5 mètre sur l'estimation de la position d'un capteur ne semble pas importante de la considérer comme une bonne estimation vue l'ordre de grandeur des dimensions du laboratoire. Même chose pour un couloir de 3 mètre de largeur et 12 mètre de longueur, malgré que l'estimation de l'erreur des distances et des positons dans ce dernier est un peut inferieure à celle dans un laboratoire, mais reste toujours l'influence des phénomènes de multi trajet et de la dynamique sur l'évaluation du RSSI qui perturbe l'estimation de la distance et qui peut augmenter l'erreur sur l'estimation des positions.

Ces résultats ne nous encourage pas à les considérer comme bornes d'erreur afin d'établir par la suite une correction sur la position estimée d'un capteur dans un milieu intérieur comme un laboratoire ou un couloir.

Dans un laboratoire, la position estimées $\hat{Z}$ du capteur Z se trouvent à l'extérieur des cercles (zone d'appartenance de la position estimée du capteur Z) l'erreur sur l'estimation de sa positions est de l'ordre des dimensions du milieu de l'expérimentation, ce là voudrait dire que la technologie est à un point mauvaise, qu'elle ne pourrait être que cassé. La position estimée $\hat{Z}$ du capteur Z devrait être trouvée à l'intersection des trois cercles correspondants.

La position $\hat{W}$ du capteur W devrait être estimée sur l'arc ab du cercle de centre le capteur ancre C_1 et de rayon d1= 5,011 m, alors qu'elle est estimée à l'extérieur des cercles correspondants. Ce point sera aussi que rejeté, car si on refait l'opération de localisation de ce dernier on le trouve dans une autre position qui peut être proche ou très loin de sa position réelle. Donc il ya une volatilité de localisation dans un milieu intérieur.

La position $\hat{T}$ du capteur T a été estimée avec une meilleure précision et ce trouve l'intérieur de l'intersection des trois cercles car c'est le capteur le plus proche aux trois capteurs ancres et sa position peut être considérer comme la position estimée du capteur T.

Dans un couloir, on a évité toute dynamique pour qu'on a eu les résultats obtenus avec des erreurs sur l'estimation des positions qui arrive jusqu'à 1 mètre. Chaque capteur a été estimé à

l'intérieur de l'intersection des trois cercles correspondants mais l'erreur sur la position des capteurs T et Z dépasse E_{RMSE}^{pos}, celle du capteur W est inférieure car ce dernier c'est le capteur le plus proche aux trois capteurs ancres.

A l'extérieur, sur un terrain dégagé, l'estimation des erreurs des distances et des positions d'un capteur est faible et les positions des capteurs sont estimées avec une meilleure précision grâce à la stabilité que connu le RSSI dans un milieu qui est particulièrement favorable, espace ouvert et pas de mobilité à l'intérieur du réseau et ces caractéristiques entraînent une meilleure propagation du signal avec de moins fortes conséquences du multi-trajet. Les trois capteurs ont été localisés avec une faible erreur et bonne précision. L'erreur de localisation est de 0,30 m et la précision atteint les 0,25 m.

On constate aussi la Complémentarité des deux algorithmes (triangulation et multilatérarion) dans un milieu extérieur où les capteurs ont été estimés par multilatération à l'intérieur de l'intersection des trois cercles correspondants déterminé par triangulation.

Les erreurs de mesure sont fortement liées à l'environnement du réseau. Dans le cas d'un déploiement en champ libre, les erreurs de mesure seront faibles. A l'inverse, un champ contenant beaucoup d'obstacles entre les capteurs sera propice à des erreurs de mesure plus importantes. En analysant préalablement le champ de déploiement il est possible de trouver une borne de ces erreurs de mesure. Cette borne est notée E_{dist}. En d'autres termes, lorsqu'un capteur « u » mesurera la distance d_{uv} qui le sépare d'un nœud voisin v, il sait que la distance exacte entre u et v est comprise entre $d_{uv} \pm E_{dist}$.

Ainsi, cette borne d'erreur peut être gérée de la même manière que la borne d'erreur de position E_{pos}: lorsqu'un cercle de rayon r est tracé par un capteur, il sera remplacé par deux cercles de rayons r $\pm$ (E_{pos}+ E_{dist}). [CLE 08]

3.6. Conclusion :

Le modèle de l'équation du bilan de liaison trouvé pratiquement confirme l'équation théorique et il est plus fiable à l'extérieur qu'à l'intérieur d'un bâtiment.

A' l'intérieur d'un bâtiment, l'instabilité et la variation du RSSI influes directement sur l'estimation des distances et les positions des capteurs, c'est qui nous interdit a utilisé le modèle du bilan de liaison trouvé. Néanmoins, il peut l'être que pour les très courtes distances ($d \leq 1m$).

Une estimation de l'erreur de localisation de 0,30 m sur un terrain dégagé de grande surface et une précision de localisation qui arrive jusqu'à 0,25 m nous pousse à considérer le RSSI comme métrique pour l'estimation des positions des capteurs dans les environnements extérieurs et le modèle de l'équation du bilan de liaison peut être très utile.

Les résultats obtenus sur un terrain dégagé donnent une crédibilité au modèle de l'équation du bilan de liaison et au RSSI à être utile pour la localisation des capteurs à l'extérieur d'un bâtiment où la précision de localisation atteint le 0,25 m.

Si on considère le RSSI comme métrique pour estimer les distances afin de localiser les capteurs, il faut limiter son utilisation que pour les milieux externes, on prenant on compte les bornes de l'erreur sur l'estimation des distances et des positions afin de faire les corrections possible qui peuvent augmenter la précision de localisation.

Le RSSI, l'indicateur de puissance de signal reçu présent sur les radios, semblait offrir un indicateur performant, ce qui confirme des études précédentes et peut être considéré comme métrique pour l'estimation des distances à l'extérieur d'un bâtiment afin de dériver les positions des capteurs dans un réseau et les distances sont bien issues d'une équation de bilan de liaison entre un émetteur et un récepteur.

Conclusion générale

Ce travail s'est attaché à apporter quelques contributions à ce vaste champ d'étude que nous ouvrent les réseaux de capteurs sans fil. Même s'il n'y a pas de hiérarchisation à faire entre les problèmes liés à ces réseaux, on constate que la résolution de bon nombre d'entre eux se verrait facilitée si les positions géographiques des capteurs étaient connues. Pour cette raison on s'intéresse à la résolution du problème de la localisation.

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.

L'étude s'est principalement focalisée sur la précision des positions attribuées aux 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 un par mis les 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 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 la puissance du signale reçu. Pour ces raisons, on a réalisé des expérimentations dans différentes environnements (à l'intérieur et à l'extérieur) pour voir le comportement du RSSI dans chacun d'eux et voir quelle est le favorable environnement où le RSSI peut être considéré comme métrique pour l'estimation des distances.

Les expérimentations ont montré que le RSSI, utilisé comme métrique de proximité, n'est pas fiable à l'intérieur d'un bâtiment en raison de son imprédictibilité et de son instabilité. Cette imprédictibilité est due à plusieurs facteurs comme l'environnement, le matériel et la distance.

Le RSSI, utilisé comme métrique de proximité, est fiable à l'extérieur d'un bâtiment en raison des caractéristiques de l'environnement qui sont particulièrement favorables , espace ouvert et pas de mobilité à l'intérieur du réseau et ces caractéristiques entraînent une meilleure propagation du signal avec de moins fortes conséquences du multi-trajet.

Après avoir limité l'utilisation du RSSI qu'a l'extérieur, la recherche d'un modèle mathématique de l'équation du bilan de liaison proche de ce lui de l'environnement s'avéré très indispensable pour l'estimation des distances qui correspondent aux valeurs des RSSI mesurés. Les résultats pratiques confirment l'équation théorique du bilan de liaison entre un émetteur et un récepteur qu'on a posé comme hypothèse de départ et les distances étaient bien issues d'une équation de ce type. La validation du modèle trouvé dans les trois environnements confirme et donne une crédibilité au RSSI d'être utile que dans les milieux extérieurs.

Malgré l'impossibilité d'utiliser le modèle obtenu pour la localisation des capteurs à l'intérieur d'un bâtiment, on a appliqué ce dernier dans les trois environnements afin de pouvoir comparer la précision de la localisation d'un capteur dans chaque environnement et confirmer l'inutilité d'utilisation du modèle à l'intérieur d'un bâtiment.

Les résultats de l'application de localisation obtenus dans les différents environnements donnent une crédibilité au modèle de l'équation du bilan de liaison et au RSSI à être utile pour la localisation des capteurs qu'à l'extérieur d'un bâtiment où **la précision** de localisation atteint les **0,25 m**. On prenant on compte des bornes de l'erreur sur l'estimation des distances et des positions afin de faire les corrections possible, augmenté le nombre de capteurs dans le réseau la précision de localisation peut être améliorée. Des études ont montrées que plus le nombre de nœud de capteur est élevé dans le réseau plus la précision de localisation est bonne. [KAC 09]

Les caractéristiques du signal et le comportement du RSSI à l'intérieur d'un bâtiment peuvent êtres utilisées pour la détection de la dynamique dans un environnement. [SAJ 08] a étudié avec succès la possibilité de détecter la présence de mobilité entre plusieurs capteurs en mesurant la puissance du signal reçu.

Pour la localisation des capteurs à l'intérieur d'un bâtiment, [CHE ,09] a proposé d'utiliser des capteurs UWB et a montré que malgré les restrictions significatives sur le niveau de puissance, l'UWB détient un énorme potentiel pour les réseaux sans fil. La technique UWB se distingue des systèmes traditionnels par différents atouts majeurs. D'une part, la largeur de bande occupée instantanément par le signal UWB conduit à une résolution temporelle très fine permettant d'envisager des applications de localisation et de communication bas ou hauts débits au sein d'un même nœud. D'autre part, la très courte durée des impulsions émises assure une transmission robuste dans un canal multi-trajets dense. Cette technique combine à la fois une faible consommation, une bonne résistance aux phénomènes multi-trajets et à l'interférence, ainsi qu'une aptitude pour la localisation. La technique UWB se caractérise également par des dispositifs de très faible complexité et d'un très faible coût.

Coté expérimentation, la programmation des capteurs ainsi que la recherche d'une application qui nous a permis d'évaluer et de récupérer le RSSI à partir de la radio de chaque capteur nous ont pris beaucoup de temps et ont limité ce projet en temps et en réalisation.

L'objectif de notre travail était de localiser automatiquement les nœuds de capteurs, mais vu que je n'ai pas arrivé à faire intégrer les RSSIs lues via le port série vers le programme écrit sous MATLAB qui exécute les algorithmes de triangulation et multilatération j'ai fait entrer à la main les valeurs de ces derniers.

En plus du RSSI, le CC2500 fournit un indicateur hardware supplémentaire, le LQI, qui est en fait une mesure du taux d'erreur binaire effectuée par le module. il n'a jusqu'à présent fait l'objet que de peu d'évaluations afin de vérifier s'il constituait réellement un bon indicateur. Par ailleurs, d'autres équipes de recherche résistent et défendent toujours le bon vieux paramètre RSSI. [KAC 09]

Parmi les perspective dans ce domaine, on peut exploiter les autres indicateurs de qualité de communication radio comme le temps d'arrivé, la différence des temps d'arrivé, l'angle d'arrivé et l'indicateur de la qualité de lien et voir qu'elle est le meilleur indicateur qui peut être un métrique de proximité à l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment.

Annexe A

- ***Matériel utilisé :***

De plus amples informations sur l'eZ430-RF2500 sont disponibles á l'adresse : http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/ez430-rf2500.html

- ***Description des capteurs MSP430: [THO 10]***

Dans cette partie, on présente une description des capteurs MSP430 de Texas Instruments. Les capteurs ont des modules conçus spécialement pour l'utilisation dans des réseaux de capteurs. Leur principal avantage est leur taille réduite, leur très faible consommation électrique et surtout leur capacité à communiquer sans fil, ce qui permet une grande liberté de mouvement par rapport aux nœuds filaires. Plusieurs produits existent sur le marché, de capacités plus ou moins équivalentes.

Les capteurs MSP430 sont Construis 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. Ces capteurs ont les caractéristiques suivantes :

- Un microcontrôleur MSP430F2274 16 bits RISC de Texas Instrument avec 27 instructions, cadencé à 8MHz, avec 1Koctet de RAM et 32Koctet+256octets de flash mémoire ROM.

  Ces modèles des microcontrôleurs ont les propriétés suivantes:

  - Fréquence interne jusqu'à 16MHz.
  - Timer A avec 3 registres 16 bits.
  - Timer B avec 3 registres 16 bits.
  - USART avec UART + SPI + I2C.
  - Convertisseurs ADC 10 bits.
  - Faible capacité de calcul.
- Radio CC2500, travail dans la bande de fréquence (2.4GHz- 2.4835GHz) Il permet de travailler sur 16 canaux étanches différents espacé de 5MHz et une vitesse de 250kbps respectant la norme IEEE 802.15.4.
- Très faible consommation électrique.
- Temps de réveil inférieur à 6µs.
- Une interface USB de programmation et de débogage nécessitant une installation de pilote.
- 18 pins accessibles.
- Une antenne PCB sur puce.
- 2 pins d'entrée/sortie connectés aux LEDs rouge et verte pour un feedback visuel.

Le code en langage C est programmé, compilé puis chargé dans la ROM du micro contrôleur MSP430-F2274 du capteur par l'intermédiaire du programmateur eZ430-RF2500.

Les données envoyées par les capteurs (nœuds) sont récupérées par la station de base (sink) branché au pc via le port série USB ce qui va permettre de les stocker et de les traiter afin de les visualiser sur le pc.

Pour le capteur MSP430, le RSSI est stocké sur 8 bits dans un registre de la radio. La valeur du RSSI est toujours moyennée sur 8 périodes de temps (128μs).

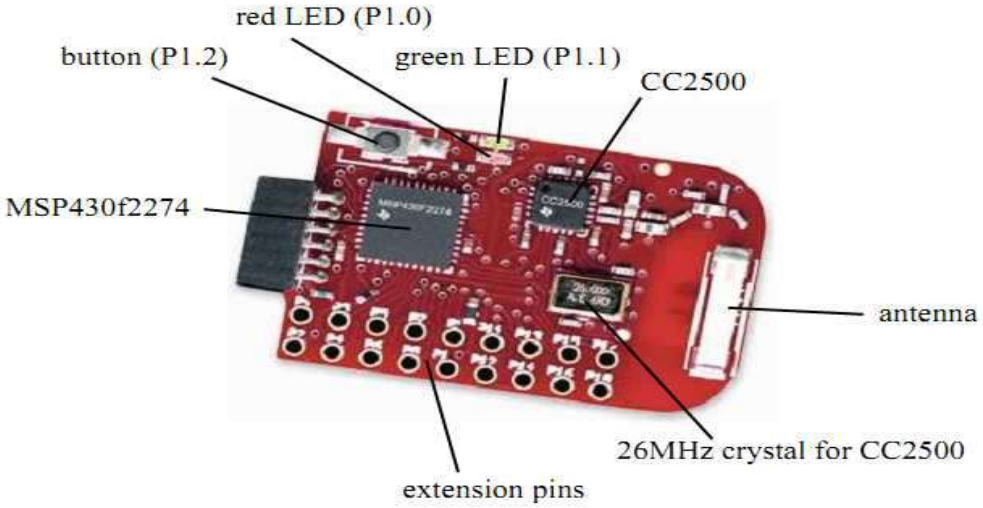


Figure A.1 : Description du capteur sans fil MSP430 eZ430-RF2500. [THO 10]

Pour plus de détaille sur le matériel utilisé consulter le site web de Texas instrument suivant:

www.TI.com et télécharger les documents (msp430rf2274.pdf - cc2500.pdf-slau144.pdf-slau227.pdf. et Slaa378.pdf) .

Annexe B

- ***Le rôle des pilotes pour le Kit eZ430-RF2500 pour le projet SimplicitTI :***

Un logiciel appelé pilote est un ensemble de programmes qui assurent la gestion et la communication avec le périphérique. Ce logiciel est étroitement lié aux caractéristiques matérielles du port d'entrée/sortie, il fournit des pilotes basiques pour une bonne partie des capteurs (les périphériques externes), il fournit également des pilotes USB, ainsi que des pilotes pour les périphériques de bas niveau du microcontrôleur (gestion d'interruptions, compteurs, convertisseurs analogue/numérique) et du code gérant la communication avec les capteurs MSP430 ce qui facilite la programmation et la configuration des réseaux de capteurs.

Les pilotes pour le Kit eZ430-RF2500 dans le cadre du projet SimplicitTI doivent faire face à un ensemble de préoccupations très spécifiques au domaine, telles que :

- Les particularités techniques des plateformes matérielles : adresses de registres de configuration ou de lecture/écriture, politiques d'interruptions, gestion de compteurs matériels.

- Les politiques de stockage d'information, dans la mesure où un pilote agit comme un buffer de données entre l'application et les ressources gérées par celui-ci.
- La tolérance aux pannes et l'administration autonome du service. En particulier, la panne d'une application ne doit pas affecter l'accès à une ressource partagée avec d'autres applications. Le pilote doit pouvoir isoler la panne ou se réinitialiser de façon autonome.
- La portabilité entre plates-formes logicielles et matérielles.
- Le découplage entre l'application et le pilote du périphérique.
- L'abstraction des détails du matériel (registres de configuration des processeurs, politiques d'interruption).
- La définition exhaustive des frontières des composants.
- La conception d'architectures par couches pour séparer les activités de capture, de raisonnement et de communication au sein des pilotes.

Annexe C

➢ *Algorithme d'émission et de réception des paquets par un capteur :* **[HUN]**

Les capteurs effectuent avant chaque transmission une évaluation du canal (clear channel assessment CCA) afin de déterminer si le canal est disponible pour la transmission des paquets et s'assure que tous les voisin sont en écoute, dans le cas contraire si le canal est occupé alors le capteur entre en mode de réception et reste en états actif jusqu'à la réception du paquet de donnée. Ce contrôle évite les collisions des données transférées.

Les capteurs s'endorment la plupart du temps pour économiser l'énergie et ils se réveillent périodiquement pour écouter les éventuelles transmissions. S'il n'y a pas d'activité dans le médium, les dispositifs retournent à l'état endormi. Au contraire, ils restent en écoute sur le canal pour recevoir d'éventuelles trames de données. Tous les nœuds utilisent la même période d'échantillonnage (le temps entre deux écoutes consécutives). Cependant, comme ils ne se synchronisent pas, cela nécessite donc que le transmetteur connaisse le moment où le récepteur se réveille pour bien transmettre ses trames de données. Si le transmetteur envoie un paquet quand le récepteur est endormi, il va provoquer le problème appelé "envoi sourd" (deaf listening). Pour remédier à ce problème, le transmetteur doit envoyer avant chaque transmission un paquet préambule qui ne contient que des bits 0 et 1 alternativement. Le paquet du préambule est composé de plusieurs petits messages contenant le temps restant pour commencer l'envoi des données.

Le but de ce paquet préambule est d'alerter le récepteur qu'il a des données à recevoir et qu'il doit rester dans l'état actif. La longueur de ce préambule doit être supérieure à la période d'échantillonnage pour pouvoir signaler tous les récepteurs dans la portée pour détecter la présence d'un préambule. Cette technique déplace la consommation d'énergie du côté transmetteur car il doit envoyer un paquet préambule avant chaque transmission.

La Figure (3.6) illustre le fonctionnement de cette technique « préambule d'échantillonnage » avec un transmetteur et un récepteur. Le récepteur se réveille périodiquement après chaque période d'échantillonnage T, lorsque le récepteur se réveille dans les deux premières périodes, il trouve qu'il n'y a aucune activité dans le médium. Donc, il se met dans l'état endormi. Le transmetteur commence sa transmission quand le récepteur est endormi. S'il transmet directement les données, le

récepteur ne va jamais recevoir ces données car il est dans l'état endormi. Donc, le transmetteur commence sa transmission par un paquet préambule d'échantillonnage.

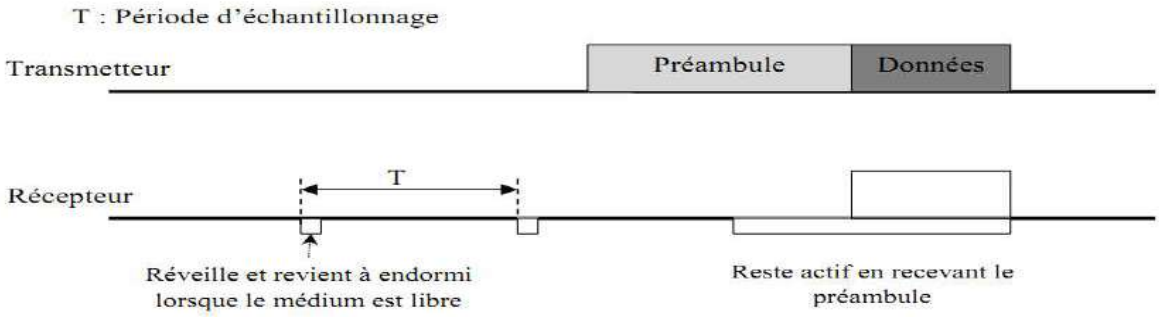


Figure C.1- Technique préambule d'échantillonnage.

Lorsque le récepteur se réveille, il trouve que le médium est occupé (par le paquet préambule), il sait qu'il y aura une transmission pour lui et reste actif pour recevoir d'éventuelles trames de données. Après avoir signalé au récepteur sa transmission par le paquet préambule, le transmetteur commence à transmettre ses trames de données en assurant que le récepteur est actif pour recevoir ses données.

La technique préambule d'échantillonnage semble bien adaptée à ce type de réseau pour réduire la consommation d'énergie. S'il n'y a pas de transmissions, les récepteurs ne consomment pas d'énergie entre les périodes d'échantillonnage.

Les transmissions sont suivies par des paquets d'acquittements afin de garantir une bonne transmission entre les nœuds et permettre d'échanger les périodes échantillonnages voir Figure (3.7).

Au début, les nœuds transmettent des trames de données en utilisant un paquet préambule de longueur normale (supérieure à la période d'échantillonnage). Ensuite, une fois que la transmission est terminée, le récepteur renvoie un paquet d'acquittement. Ce paquet d'acquittement signale au transmetteur qu'il a bien reçu les données. Mais, le récepteur ajoute aussi dans son paquet d'acquittement une information supplémentaire qui est sa période d'échantillonnage. Après avoir reçu le paquet d'acquittement, le transmetteur peut mettre à jour la période d'échantillonnage du récepteur dans sa table des voisins. Pour la prochaine transmission, le transmetteur connaîtra la période d'échantillonnage du récepteur, il transmettra juste avant le réveil du récepteur. La Figure 3.7 illustre le fonctionnement du protocole.

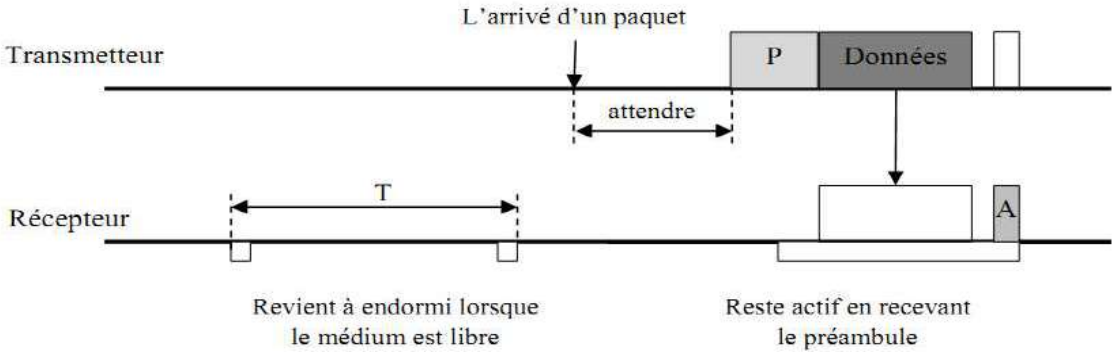


Figure C.2: Réduction de la durée de préambule.

A l'arrivée d'un paquet, quand le transmetteur connaît déjà la période d'échantillonnage du récepteur, il n'envoie pas le préambule toute de suite. Il attend et il envoie le préambule juste un peu avant le réveil du récepteur. La transmission se termine par un paquet ACK envoyé par le récepteur pour signaler une bonne réception des trames de données et annoncer sa période d'échantillonnage en même temps.

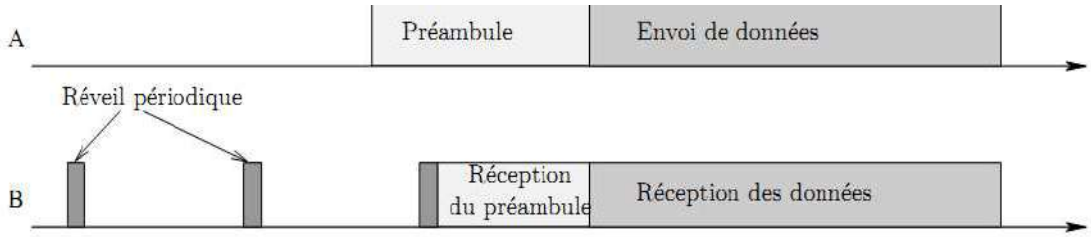


Figure C.3: L'émetteur utilise un long préambule pour permettre au récepteur d'activer son module radio seulement de temps en temps.

C'est une méthode efficace pour que le transmetteur sache le moment où le récepteur se réveille, il peut se réveiller juste un peu avant ce moment sans envoyer un long paquet préambule. En effet, chaque nœud maintient une table contenant les périodes d'échantillonnages de tous les voisins.

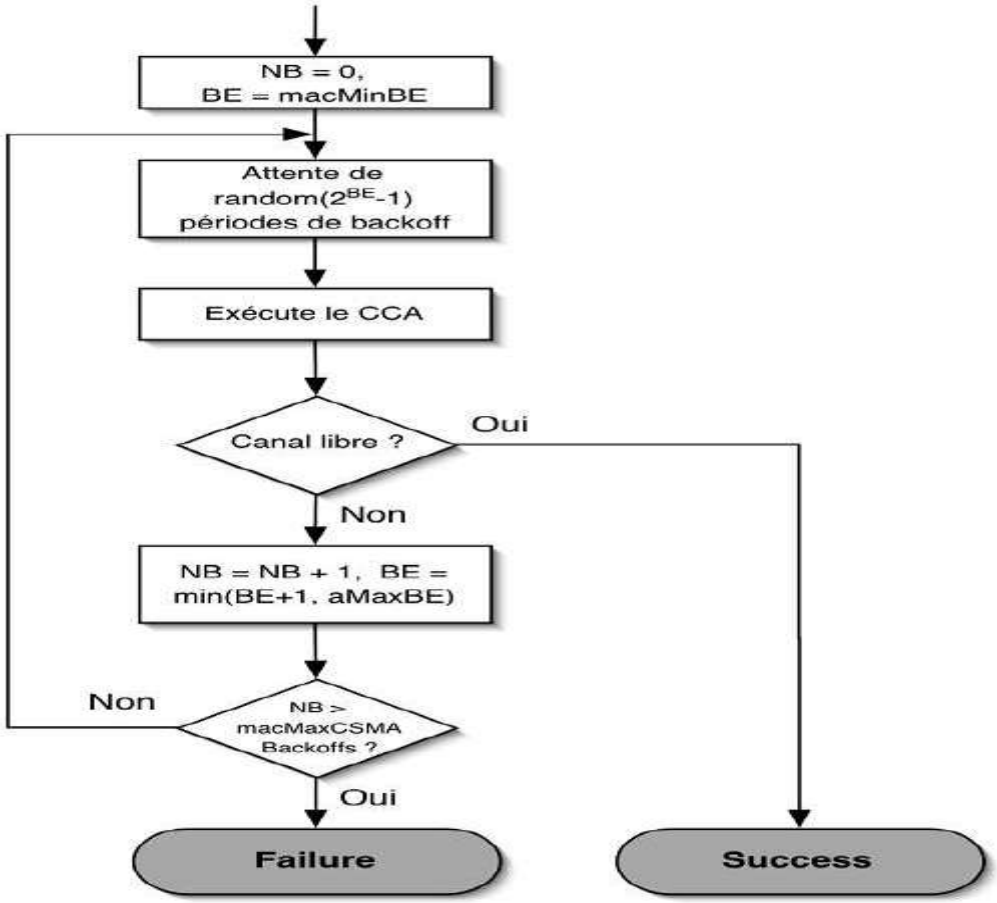


Figure C.8: Algorithme CSMA-CA "unslotted"[VER 03]

- ***Le code source du programme txrx_wsn.c :***

```
#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"

uint8_t wakeup_cycles_before_send = SEND_PERIOD;

int main(void)
{
  WDTCTL = WDTPW + WDTHOLD;
  BSP_Init();
  MRFI_Init();
  gradient_Init(IS_SINK_NODE);
  __bis_SR_register(GIE+LPM0_bits);
}

#pragma vector=TIMERA0_VECTOR
__interrupt void Timer_A0 (void)
{
  print_interrupt("\r\nTIMERA0",9);
  // change TIMERA0 period randomly
  uint16_t fixed_part, random_part, random;
  fixed_part     = 1500*WAKEUP_PERIOD_S_FIXED;
  random_part    = WAKEUP_PERIOD_S_RANDOM;
  if (WAKEUP_PERIOD_S_RANDOM!=0) {
    random_part |= MRFI_RandomByte();
    random_part |= (MRFI_RandomByte()<<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;
  //add data message to buffer
  wakeup_cycles_before_send--;
  if (wakeup_cycles_before_send==0) {
    gradient_generate_data();
    wakeup_cycles_before_send=SEND_PERIOD;
  }
  //send oldest buffered message
  gradient_send_data();
}

#pragma vector=TIMERB0_VECTOR
__interrupt void Timer_B0 (void)
{
  print_interrupt("\r\nTIMERB0",9);
  gradient_wakeup_timer();
```

```
}

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

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;                           // clear interrupt flag
  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);        // Clear CPUOFF bit from SR
}

/*#pragma vector=USCIAB0RX_VECTOR
__interrupt void serialRx (void)
{
  P1OUT ^= 0x03;
  IFG2 &= ~0x01;
}

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

Annexe D :

- ***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 oudans 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 développement de la plupart des logiciels libres. Le noyau Linux dépend notamment étroitement des fonctionnalités de GCC.

- ***Le code source du programme txrx_wsn.py :***

```
#!/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
```

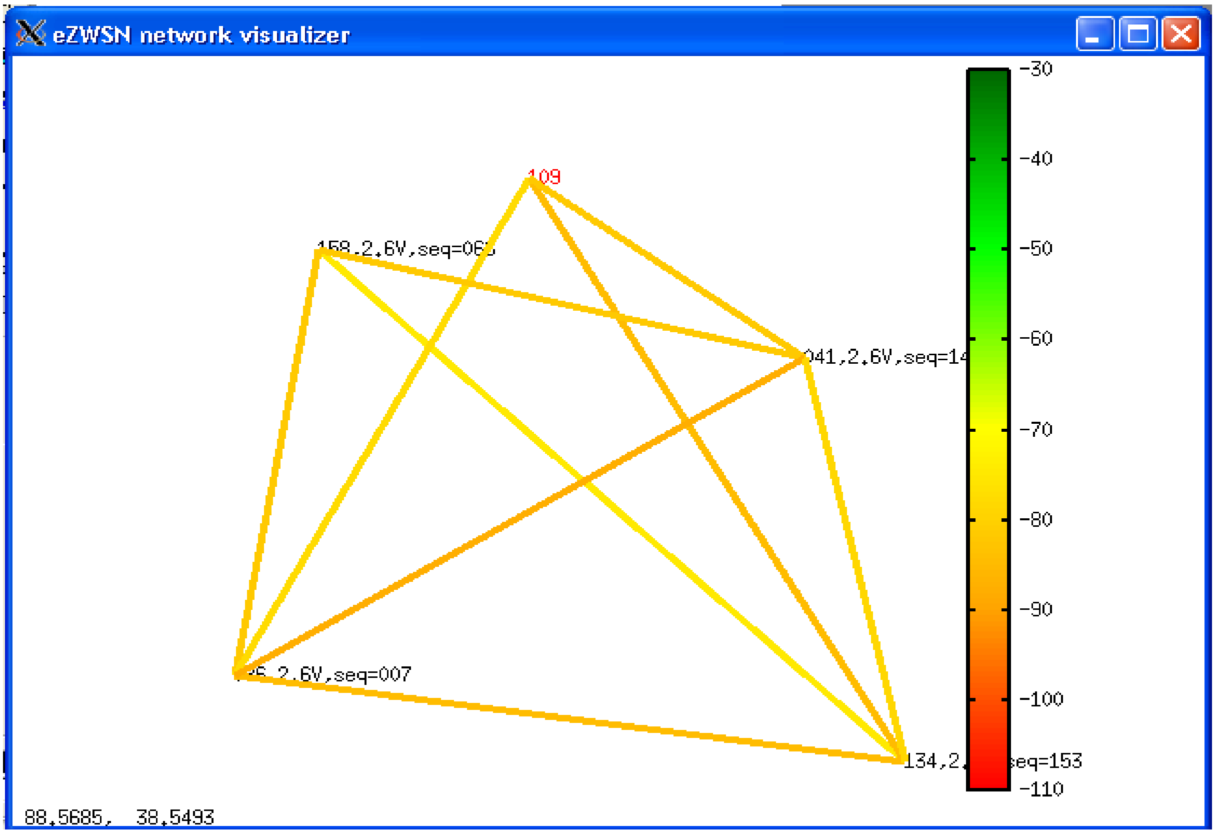
Annexe E:

- ***Le code source du programme nommé localisation_wsn.m (qui réalise la triangulation et la multilatération) sous MATLAB :***

```
%  rssi=-65-20*log(d)
function y= wsn_1(c1,c2,c3)
input(' donner les valeur de rssi1 ,rss2  ,rss3 respectivement');
rssi1=input(' rssi1=');
rssi2=input(' rssi2=');
rssi3=input(' rssi3=');
d1=10^((-65-rssi1)/20);
d2=10^((-65-rssi2)/20);
d3=10^((-65-rssi3)/20);
x11=c1(1,1);x12=c1(1,2);
x21=c2(1,1);x22=c2(1,2);
x31=c3(1,1);x32=c3(1,2);
          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
test21= sqrt(abs(x11-x21)^2+abs(x12-x22)^2)-(d1+d2);
test13= sqrt(abs(x11-x31)^2+abs(x12-x32)^2)-(d1+d3);
test32= sqrt(abs(x31-x21)^2+abs(x32-x22)^2)-(d3+d2);
p = max([d1,d2,d3])+abs(max([x11,x12,x21,x22,x31,x32]));
           %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
a=[2*(x11-x31),2*(x12-x32) ; 2*(x21-x31),2*(x22-x32)];
b=[(x11)^2-(x31)^2+(x12)^2-(x32)^2+(d3)^2-(d1)^2;
   (x21)^2-(x31)^2+(x22)^2-(x32)^2+(d3)^2-(d2)^2];
c=(inv((a')*a))*(a')*b;
c4 = c';
x41=c4(1,1);
x42=c4(1,2);
          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
eq1 = @(x,y)(x-x11)^2 + (y-x12)^2-d1^2 ;
eq2 = @(x,y)(x-x21)^2 + (y-x22)^2-d2^2 ;
eq3 = @(x,y)(x-x31)^2 + (y-x32)^2-d3^2 ;
          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('d1= la distance entre le capteur à localiser et le cap 1:');disp(d1);
disp('d2= la distance entre le capteur à localiser et le cap 2:');disp(d2);
disp('d3= la distance entre le capteur à localiser et le cap 3:');disp(d3);
disp('test21:');disp(test21);
disp('test13:');disp(test13);
disp('test32:');disp(test32);
disp('la valeur de x estimé  ');disp(c4(1,1));
disp('la valeur de y estimé '); disp(c4(1,2));
          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
   hold on
 ezplot(eq1,[-p p]); ezplot(eq2,[-p p]); ezplot(eq3,[-p p]);axis([-p p -p p]);
 plot(x11,x12,'b*',x21,x22,'b*',x31,x32,'b*',x41,x42,'ro');
 text (x11+0.1,x12+0.1,'cap1');
 text (x21+0.1,x22+0.1,'cap2');
 text (x31+0.1,x32+0.1,'cap3');
 title('localisation dans les wsn');
 xlabel('X-axs (m)');
 ylabel('Y-axs (m)');
 grid;

end
```



Exemple d'une carte relative d'un réseau de cinq capteurs sans fil.

Bibliographie

[ABO 05] : Aboclaze, M. et F. Aloul. «Current and future trends in sensor networks: a survey. » Wireless and Optical Communications Networks. 2005.

[AND 05] : Andrea Goldsmith. Wireless Communications. Cambridge University Press, 2005.

[ASSC 02]: Ian F.Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Eredal Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks, 2002.

[BAD 99] : Badache, N. et T. Lemlouma. «Le routage dans les réseaux mobiles ad hoc.» Rapport de recherche de l'INRIA. 1999. de test et d'expérimentation.» Mémoire pour l'obtention d'un master technologie de l'internet. 2006.

[BAH 00] : P. Bahl and V.N. Padmanabhan. Radar: an in-building RF-based user location and tracking system. Computer and Communications Societies (Infocom'00), volume 2, Tel Aviv, 2000.

[BHA 05] : Bhaskar Krishnamachari, «Networking wireless sensors», Cambridge university press, 2005.

[BHA 06] : Bhaskar Krishnamachari. Networking Wireless Sensors. Cambridge University Press, 2006.

[BOU 07] : Bouabdellah Kechar, « problématique de la consommation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil », LIUPA, université d'Oran, Octobre 2007.

[BUL 02] : N. Bulusu. Self Configuring Location Systems. PhD thesis, University of California, 2002.

[CAS 08] : Claude Castelluccia, « la sécurité des capteurs et réseaux de capteurs », INRIA, Juin 2008.

[CED 08] : Cédric Bastien ; Développement d'un outil permettant le suivi d'un objet mobile ; Rapport de projet de fin d'étude ; ISA-SERTR. 2008.

[CHA 09] : Chalhoub Gerard, Réseaux de capteurs sans fil, 2009.

[CHA 10] : Yacine Challal, Hatem Battahar, Abdelmadjid Bouabdallah, «Les Réseaux de capteurs (WSN: Wireless Sensor Networks) », support de cours, UTC 2010.

[CHE ,09] : Abdellah Chehri, Étude d'un réseau de capteur UWB pour la localisation et la communication dans un environnement minier, Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de doctorat en génie électrique pour l'obtention du grade de Philosophie doctoral (Ph.D.), Faculté des sciences et de génie Université LAVAL QUÉBEC, 2009.

[CLE 08] : Clément Saad, Quelques contributions dans les réseaux de capteurs sans fil : Localisation et routage, Ecole doctoral 166 I2S, Mathématiques et informatique, Université d'Avignon et pays de Vaucluse, doctorat 2008.

[DOU 06] : Doufène, N et H Hadjammar. «Routage dans les réseaux de capteurs : optimisation du protocole Directed Diffusion.» Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état. Institut National de formation en Informatique, 2006.

[HAM07] : Hamzi, A. «Plateforme basée agent pour l'aide à la conception et à la simulation des réseaux de capteurs sans fils.» Mémoire pour l'obtention du diplome de magistere en informatique. 2007.

[HAS 93] : H. Hashemi. The indoor radio propagation channel, 1993.

[HEI 00] : N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin. GPS less low cost outdoor localization for very small devices. 2000.

[HOL 05] : K. Holger and Andreas Willig. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Wiley, 2005.

[HUN] : Hung-Cuong LE, Optimisation d'accès au médium et stockage de données distribuées dans les réseaux de capteurs, , Grade de Docteur, de l'Université de Franche-Comté Spécialité INFORMATIQUE ET TECHNIQUES DE L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ.

[JAS 03] : Jason Lester Hill, « System Architecture for Wireless Sensor Networks », University of California, Berkeley, spring 2003.

[KAC 09] : Rahim KACIMI, Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil, doctorat de l'université de TOULOUSE, délivré par l'Institut National Polytechnique de Toulouse Spécialité : Réseaux et Télécommunications, 2009.

[KHE 04] : Lyes Khelladi, Nadjib Badache, «Les réseaux de capteurs : état de l'art», rapport de recherche, USTHB, Alger, Février 2004.

[KRI 04] : P. Krishnan, A. S. Krishnakumar, Wen hua Ju, Colin Mallows, and

Sachin Ganu. A system for lease: Location estimation assisted by stationery emitters for indoor RF wireless networks. Computer and Communications Societies (INFOCOM), Hong-Kong, China, 2004.

[LAN 03] : K. Langendo en and N. Reijers. Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison. Computer Networks, 2003.

[LEH 09] : LEHSAINI Mohamed, «Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique», Thèse de Doctorat Spécialité Informatique, Université A.B Tlemcen Faculté des Sciences pour l'Ingénieur, 2009.

[LEW 04]: F. L. Lewis, « wireless sensor networks», rapport de recherche, The University of Texas, 2004.

[MOH05]: Mohammad Ilyas, Imad Mahgoub, « Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems», chapitre 15, CRC Press LLC, 2005.

[NEA 03]: Neal Patwari and Alfred O. Hero, III. Using proximity and quantized RSS for sensor localization in wireless networks. USA, 2003.

[NIC 03] : D. Niculescu and B. Nath. DV Based Positioning in Ad Hoc Networks. Telecommunication Systems, 2003.

[PAR 05] : Parrend Pierre, Localisation dans les réseaux de capteurs, INSA Lyon, 2005.

[PRI 03] : N.B. Priyantha, H. Balakrishnan, E. Demaine, and S. Teller. Anchor free distributed localization in sensor networks. Proc. 1st Inter. Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003).

[RAM 09] : B. Raman, K. Chebrolu, D. Gokhale, and S. Sen. On the feasibility of the link abstraction in wireless mesh networks. Transactions on Networking, 2009.

[SAJ 08] : Sajid Hussain, Richard Peters, and Daniel L. Silver. Using received signal strength variation for surveillance in residential areas. In Data mining, intrusion detection, information assurance, and data networks security (SPIE), Florida, USA, 2008.

[SAV 01] : Savvides, A., C.-C. Han et M. Srivastava. «Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors. » Mobile Computing and Networking (MobiCom). ACM, 2001.

[SHA 03] : Yi Shang, Wheeler Ruml, Ying Zhang, and Markus P. J. Fromherz. Localization from mere connectivity. Annapolis, MD, USA, 2003.

[SOH 07] : Kazem Sohraby, Daniel Minoli, Taieb Znati, «wireless sensor networks: Technology, protocols and applications», John Wiley & Sons, Inc, 2007.

[SUG 06] : M. Sugano, T. Kawazoe, Y. Ohta, and M. Murata. Indoor localization system using RSSI measurement of wireless sensor network based on zigbee standard. Canada, 2006.

[TEX 06] : Texas Instruments. Chipcon CC2420: Datasheet, 2006.

[THO 05] : Thomas Watteyne, « proposition et validation formelle d'un protocole MAC temps réel pour réseaux de capteur sans fil », mémoire de master, laboratoire CITI, Lyon, 2005

[THO 08] : Thomas Watteyne. Energy-Efficient Self-Organization for Wireless Sensor Networks. PhD thesis, INSA de Lyon, November 2008.

[THO 10] : Thomas Watteyne, eZWSN, Rice University, Houston, Texas: Experimenting with Wireless Sensor Networks using the Ez430-RF2500, 2010.

[VAN 07] : Van der Haegen Mathieu ; Réseau de senseurs sans fil : Problèmes de localisation ; Université libre de Bruxelles ; département de l'informatique ; licence informatique 2007.

[VER 03] : VERNEZ Jérôme, Adaptation de la couche MAC du standard IEEE 802.15.4 à une couche physique Ultra Wide Band, CSEM ,2003.

[WAL 98] : E. Walker, H.-J. Zepernick, and T. Wysocki. Fading measurements at 2.4 GHz for the indoor radio propagation channel, Zurich, Switzerland, 1998.

[XAV 05] : Xavier Puga, «introduction aux réseaux de capteurs », 2005.

[XIA 05] : Xiaoli Li, Hongchi Shi, and Yi Shang. A sorted RSSI quantization based algorithm for sensor network localization, Japan, July 2005.

[YAN08] : Yannick Darcillon, Localisation des noeuds dans les Réseaux de capteurs sans fil, Master 2, Université d'AVIGNON. 2008.

[YAS07] : Yasser Romdhane, «évaluation des performances des protocols S-MAC et directed diffusion dans les réseaux de capteurs », rapport de projet de fin d'étude, école supérieure des communications de Tunis, 2007.

[ZHE 04] : Zheng J., Myung L., « Will IEEE 802.15.4 make ubiquitous networking a reality ? », The city college of CUNY, IEEE Communications Magazine, juin 2004.

WEBOGRAPHIE

[1]: http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/ez430-rf2500.html.

[2]: http://www.ti.com/litv/zip/s lac139b.

[3]:http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/iar-kickstart.html.

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

[5]: http://the.eart h.li/~sgtatham/putty/latest/x86/putty.exe.

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

[7]: www.TI/MSP430.com.

[8] : www.TI.com