République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. YAHIA Fares de Médéa



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique et d'Informatique

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

De Master en Systèmes de Télécommunications

La Localisation dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil : Cas d'un Milieu Fermé

Proposé et dirigé par:

M. BENGHERBIA Bilel.

Présenté par :

LEBOUKH Aboubakre.

SAIDI Madani Amine.

Année Universitaire 2012-2013

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier tout le corps enseignant qui a contribué à notre formation, plus particulièrement notre encadreur **M. BENGHARBIA Bilel** pour son aide et les précieux conseils qu'il a bien voulu nous donner.*

Nos remerciements s'étendent également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.

*Nos vifs remerciements vont au **Scout Musulman Algérien**, plus particulièrement à **M. SAFAR BOUNI Fodil** Et **M. LEBOUKH Mohammed** pour leur soutien moral et pour leur permission d'exploiter le siège du scout, pour réaliser une partie de notre projet.*

*On tient à remercier aussi **M. LEBOUKH Abdelkader** de **HIVA INFORMATIQUE** pour son contribution à l'arrangement de ce mémoire.*

*Nous n'oublions pas **M. Ferradji MOHAMED ADLAN** et **M. KEBAILI Abderrahmane** nos proches amis qui nous ont soutenu et encouragé.*

*Nous remercions aussi vivement tous les travailleurs du magasin de pôle universitaire **YAHIA Fares** de Médéa ainsi que toutes les personnes qui nous ont aidées de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.*

Dédicaces

Tout d'abord je tiens à remercier ma ***mère*** *et mon* ***défunt père*** *pour leur soutien et leurs encouragements et qu'aucune dédicace ne pourra compenser leur sacrifice pour mon bien être et mon bonheur.*

A mes chers frères ***Mohamed, Bilel*** *et* ***Khaled*** *pour lequel j'ai beaucoup d'estimes.*

A ma sœur ***Messaouda*** *que je lui souhaite une longue vie pleine de joie et de réussite.*

A mes oncles, mes tantes et toute ma famille.

A mes amis, en particulier mon collègue du présent projet ***SAIDI Madani Amine*** *qui n'a jamais manqué de travailler et ceux de la promotion de la 2ème année master systèmes de télécommunications.*

A notre encadreur ***M. BENGHARBIA Bilel.***

Et à tous ceux qui nous ont soutenus pour l'achèvement de ce projet avec réussite. Je dédie ce modeste travail.

LEBOUKH Aboubakre



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite,

***A ma mère** ...*

***A mon père**, école de mon enfance, qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide.*

*Que **ALLAH** les gardes et les protège.*

***A** mon adorable sœur.*

***A** mes frères.*

***A** mes amis, en particulier mon binôme de ce projet*

M. LEBOUKH Aboubakre.

A** notre encadreur **M. BENGHARBIA Bilel.

***A** tous ceux qui me sont chères.*

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

Je dédie ce modeste travail.

SAIDI Madani Amine



الملخص:

استكشاف المواقع هو من أكثر الأشياء تعقيدا في شبكات المستشعرات اللاسلكية، ولا سيما في ما يتعلق الأمر بالأماكن المغلقة. في هذا العمل قمنا بدراسة تأثير عدة عوامل على الدقة في التموقع، منها البيئة المستهدفة في حد ذاتها و كذلك مختلف عوامل البرنامج المقترح في هذه المذكرة و الذي يعتمد في أساسه على طريقة البصمات الرقمية و التي بدورها تستعمل تقنية البحث عن الجيران الأكثر قربا من أجل تقدير المواقع.

كلمات مفتاحية: شبكات المستشعرات اللاسلكية، استكشاف المواقع، التموقع، البصمات الرقمية، الجيران الأكثر قربا...

Résumé :

Le positionnement est l'une des choses les plus complexes dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), en particulier, en ce qui concerne les environnements fermés. Dans ce travail nous avons étudié l'effet de plusieurs facteurs sur la précision de localisation, y compris l'environnement cible lui-même, ainsi que de différents paramètres du programme proposé dans ce mémoire, qui est basé sur la méthode d'empreintes digitales, cette dernière utilise la technique de recherche des k plus proches voisins (k-ppv) pour estimer les positions.

Mots clés : Réseax de capteurs sans fil (RCSF), positionnement, localisation, empreinte digitales, k-ppv…

Abstract:

Positioning is one of the most complex things in wireless sensor networks (WSN), in particular, what comes to indoor environments. In this work we studied the effect of several factors on the accuracy of localization, including target environment itself, as well as the various parameters of the program proposed in this thesis, which is basically based on the method of fingerprinting, this latter uses the k nearest neighbors search technic (k-NN) to estimate positions.

Keywords: Wireless sensors networks (WSN), positioning, localization, fingerprinting, k-NN….

Table des Matières

Table des Matieres ---------- **V**

Liste des Figures ---------- **VII**

Liste des Tableaux ---------- **IX**

Liste des Annexes ---------- **IX**

Introduction Generale ---------- **1**

Chapitre 1 - Introduction Aux Reseaux De Capteurs Sans-Fil ---------- **4**

1.1. INTRODUCTION ---------- **5**
1.2. LES RESEAUX AD HOC ---------- **5**
1.2.1. Définition des Réseaux Ad hoc ---------- 5
1.2.2. Applications des Réseaux Ad Hoc ---------- 6
1.3. RESEAUX DE CAPTEURS SANS-FIL ---------- **6**
1.3.1. Anatomie d'un Nœud Capteur ---------- 6
1.3.2. Architecture d'un RCSF ---------- 7
1.4. LES BASES DE ZIGBEE ---------- **9**
1.4.1. C'est quoi Zigbee ---------- 9
1.4.2. Topologies dans le Réseau Zigbee ---------- 10
1.4.3. Les Principes de Communication de Zigbee et IEEE802.15.4 ---------- 11
1.4.4. Les Couches de Zigbee et IEEE 802.15.4 ---------- 14
1.5. DOMAINES D'APPLICATION DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL ---------- **15**
1.5.1. Applications Militaires ---------- 15
1.5.2. Applications Liées à la Sécurité ---------- 16
1.5.3. Applications Environnementales ---------- 17
1.5.4. Applications Médicales ---------- 18
1.5.5. Applications Ecologiques ---------- 18
1.5.6. Applications de Traçabilité et de Localisation ---------- 18
1.5.7. Applications Commerciales ---------- 18

Chapitre 2 - Theorie de Localisation dans les RCSFs ---------- **19**

2.1. INTRODUCTION ---------- **20**
2.2. LA NECESSITE DE LA LOCALISATION DANS LES RCSFS ---------- **20**
2.3. CONTRAINTES POUR UN SYSTEME DE LOCALISATION ---------- **21**
2.3.1. Auto-Organisation : ---------- 21
2.3.2. Evolutivité (extensibilité, échelle) : ---------- 22
2.3.3. Robustesse ---------- 22
2.3.4. Efficacité dans l'Utilisation des Ressources du RCSF : ---------- 22
2.4. PROPRIETES D'UN SYSTEME DE LOCALISATION ---------- **23**
2.4.1. Position Physique et/ou Symbolique ---------- 23

2.4.2. Coordonnées Absolues ou Relatives ----23
2.4.3. Calcul Centralisé ou Distribué ----23
2.4.4. Exactitude et Précision----24
2.4.5. Echelle ----24
2.4.6. Limites ----24
2.4.7. Coût ----24
2.5. LES SYSTEMES DE LOCALISATION ---- 25
2.6. MESURE DE DISTANCE DANS LES SYSTEMES DE LOCALISATION ---- 25
2.6.1. Temps d'Arrivée (ToA) ----25
2.6.2. Différence de Temps d'Arrivée (TDoA) ----26
2.6.3. Indicateur de Puissance du Signal Reçu (RSSI)----27
2.6.4. L'Angle d'Arrivée (AoA) ----28
2.7. SOURCES D'ERREUR DANS LA LOCALISATION BASEE SUR RSSI ---- 29
2.8. LES TECHNIQUES DE LOCALISATION DANS LES RCSFS---- 30
2.8.1. Trilatération ----31
2.8.2. Triangulation ----31
2.8.3. Fingerprinting (Prise d'Empreintes Digitales) ----32
2.9. LA RECHERCHE DES PLUS PROCHES VOISINS---- 36
2.9.1. Algorithme de *k*-ppv ----38

Chapitre 3 - Etude Experimentale---- 40

3.1. INTRODUCTION---- 41
3.2. SIMULATION ---- 41
3.2.1. Phase 1 : Base de Données ----41
3.2.2. Phase 2 : Localisation ----43
3.2.3. Discussion ----48
3.2.4. Conclusion 1 ----49
3.3. ETUDE EXPERIMENTALE ---- 49
3.3.1. Présentation du Matériel ----50
3.3.2. Configuration du Matériel ----52
.3.3.3 1er Essai----52
3.3.4. Conclusion 2 ----58
3.3.5. 2ème Essai ----58
3.3.6. Conclusion 3 ----61

Conclusion Générale---- 62

Liste des Références---- --64

Annexe ---- 65

Liste des Figures

Figure 1.1: Un réseau Ad Hoc. 5
Figure 1.2: Le changement de l'emplacement des nœuds dans les réseaux Ad Hoc. 6
Figure 1.3: Architecture typique d'un capteur sans fil 7
Figure 1.4: Architecture d'un RCSF 8
Figure 1.5: Architecture générique d'un RCASF 8
Figure 1.6: Les différents types d'architecture des RCASF 9
Figure 1.7 Architectures réseaux existantes. 11
Figure 1.8 Topologies ZigBee. 11
Figure 1.9 : Transfert de données à un coordonnateur dans IEEE 802.15.4 12
Figure 1.10: Transfert de données à partir d'un coordonnateur à un périphérique 13
Figure 1.11 : les couches de protocole du réseau sans fil ZigBee 14
Figure 1.12 : Applications des RCSF 16
Figure 2.1 : Principe du TDoA 27
Figure 2.2 : le positionnement par trilatération 31
Figure 2.3 : Estimation de triangulation 32
Figure 2.4 : La localisation basée sur les empreintes digitales 34
Figure 2.5 : l'effet de k dans la méthode k-ppv 37
Figure 2.6 : L'organigramme de fingerprinting. 39
Figure 3.1 : zone de localisation (simulation) 42
Figure 3.2 : résultats du test en utilisant la distance Euclidienne et Manhattan 45
Figure 3.3 : Erreur moyenne (mètre) de 546 points en utilisant la distance Euclidienne pour différents valeurs de k et p (1m). 46
Figure 3.4 : Erreur moyenne (mètre) de 546 points en utilisant la distance Manhattan pour différents valeurs de k et p (1m). 47
Figure 3.5 : Erreur moyenne (mètre) de 546 points en utilisant la distance Euclidienne pour différents valeurs de k et p (0.5m). 47
Figure 3.6 : Erreur moyenne (mètre) de 546 points en utilisant la distance Manhattan pour différents valeurs de k et p (0.5m). 48
Figure 3.7 : Le kit de développement Zigbee CC2530 50

Figure 3.8 :module d'évaluation 51
Figure 3.9 : carte d'alimentation 51
Figure 3.10 : carte d'évaluation 51
Figure 3.11 : Le plan du siège de l'SMA de Médéa 52
Figure 3.12 : l'environnement du 1er essai 53
Figure 3.13 : Distribution des nœuds références et lecteurs dans la zone de localisation 54
Figure 3.14 : un petit réseau de capteurs en utilisant le kit CC2530 54
Figure 3.15 : L'interface de SmartRF Studio 7 55
Figure 3.16 : Erreur moyenne (mètre) de 70 points en utilisant la distance Euclidienne pour différents valeurs de k et p (1er essai , 1 m avec 52 références). 56
Figure 3.17 : Erreur moyenne (mètre) de 70 points en utilisant la distance Manhattan pour différents valeurs de k et p (1er essai , 1 m avec 52 références). 56
Figure 3.18 : Erreur moyenne (mètre) de 70 points en utilisant la distance Euclidienne pour différents valeurs de k et p (1er essai , 0.5 m avec 171références). 57
Figure 3.19 : Erreur moyenne (mètre) de 70 points en utilisant la distance Manhattan pour différents valeurs de k et p (1er essai , 0.5 m avec 171 références) 57
Figure 3.20 : l'environnement du 2ème essai 59
Figure 3.21 : Distribution des nœuds références et lecteurs dans la zone de localisation 59
Figure 3.22 : Erreur moyenne (mètre) de 30 points en utilisant la distance Euclidienne pour différents valeurs de k et p (2ème essai). 60
Figure 3.23 : Erreur moyenne (mètre) de 30 points en utilisant la distance Manhattan pour différents valeurs de k et p (2ème essai). 60

Liste des Tableaux

Tableau 3.1 résultats du test en utilisant la distance Euclidienne 44
Tableau 3.2 résultats du test en utilisant la distance Manhattan 44
Tableau 3.3 erreurs moyennes pour k=1 49
Tableau 3.4 erreurs moyennes pour k=3 49
Tableau 3.5 erreurs moyennes pour k=54 49
Tableau 3.6 Comparaison entre simulation et 1er essai (Distance Euclidienne) 58
Tableau 3.7 Comparaison entre simulation et 1er essai (Distance Manhattan) 58
Tableau 3.8 Comparaison entre le 1er essai et le 2ème essai (Distance Euclidienne) 61
Tableau 3.9 Comparaison entre le 1er essai et le 2ème essai (Distance Manhattan) 61

Liste des Annexes

Annexe A: programme de localisation 66
Annexe B: Erreur moyenne (mètre) de **546** points en utilisant la distance **Euclidienne** pour différents valeurs de **k** et **p**, pour une distance inter-référence égale à **1m** 68
Annexe C: Erreur moyenne (mètre) de **546** points en utilisant la distance **Manhattan** pour différents valeurs de **k** et **p**, pour une distance inter-référence égale à **1m** 69
Annexe D: Erreur moyenne (mètre) de **546** points en utilisant la distance **Euclidienne** pour différents valeurs de **k** et **p**, pour une distance inter-référence égale à **0.5m** 70
Annexe E: Erreur moyenne (mètre) de **546** points en utilisant la distance **Manhattan** pour différents valeurs de **k** et **p**, pour une distance inter-référence égale à **0.5m** 73
Annexe F: Base de Données des RSSI du **1er Essai (Siège SMA)** 77
Annexe G: Valeurs RSSI des nœuds cibles du **1er essai (Siège SMA)** 80
Annexe H: Base de Données des RSSI du **2ème Essai (Magasin Pôle Universitaire)** 82
Annexe I: Valeurs RSSI des nœuds cibles du **2ème essai (Magasin Pôle Universitaire)** 83
Annexe J: Résultats du positionnement **(1er essai) (**distance euclidienne, k=8, p=4, base de données de 52 références) 84
Annexe K: Résultats du positionnement **(2ème essai)** (distance euclidienne, k=7, p=3) 85

Liste des Abréviations

CCA	Clear Channel Assessment
CP	Carte de Probabilité
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Acess with Collision Avoidance
CT	Centre de Traitement
DoA	Direction of Arrival
EQM	Erreur Quadratique Moyenne
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full Function Device
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Elictrical and Electronic Engineers
k-NN	K Nearest Neighbors
k-ppv	K Plus Porches Voisins
LPS	Local Positioning System
LQI	Link Quality Indicator
MANET	Mobile Ad hoc Network
OEM	Original Equipment Manufacturer
PAN	Personal Area Network
PDF	Probability Density Function
PPV	Plus Porches Voisins
RCASF	Réseau de Capteurs et Acteurs Sans Fil
RCSF	Réseau de Capteurs Sans Fil
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Function Device
RSSI	Received Signal Strength Indicator
TDoA	Time Diffrence of Arrival
ToA	Time Arrival
UIT	Union International de Telecommunication
WGS84	World Geodetic System 1984
WSN	Wireless Sensors Network

Introduction Générale

L'essor des technologies sans fil offre aujourd'hui de nouvelles perspectives dans le domaine des télécommunications. En comparaison avec l'environnement filaire, l'environnement sans fil permet aux utilisateurs une souplesse d'accès et une facilité de manipulation des informations à travers des unités de calcul mobiles (PC portable, PDA, capteur…).

Les réseaux sans fil peuvent être classés en deux catégories : les réseaux avec infrastructure fixe préexistante, et les réseaux sans infrastructure. Dans la première catégorie, une importante infrastructure logistique et matérielle est nécessaire pour le déploiement du réseau ; le modèle de la communication utilisé est généralement le modèle cellulaire (les réseaux GSM par exemple). La deuxième catégorie est celle des réseaux ad hoc. Un réseau ad hoc peut être défini comme un ensemble d'entités mobiles interconnectées par une technologie sans fil formant un réseau temporaire sans l'aide de toute administration ou de tout support fixe.

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) - Wireless Sensors Networks (WSN) - sont considérés comme un type spécial de réseaux ad hoc. Ce type de réseaux consiste en un ensemble de nœuds communicants capables de réaliser des mesures environnementales. Les exemples typiques incluent la température, la lumière, le bruit, l'humidité, etc. Ces mesures de capteurs sont transmises à travers un canal radio vers un nœud centrale qu'on appelle Sink et puis vers une application dédiée qui prend des décisions basées sur ces lectures de sonde.

La taille de plus en plus réduite des micro-capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations,...) ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications. Ils permettent aussi d'étendre les applications existantes et de faciliter la conception d'autres systèmes tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage. Les réseaux de capteurs ont le potentiel de révolutionner la manière même de comprendre et de construire les systèmes physiques complexes. Les réseaux de capteurs peuvent se révéler très utiles dans de nombreuses applications lorsqu'il s'agit de collecter et de traiter des informations provenant de l'environnement. Parmi les domaines où ces réseaux peuvent offrir les meilleures contributions, nous citons les domaines : militaire, sécurité environnemental, écologique, santé, commerciale, traçabilité et localisation, …etc.

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. Sans cette information, ces applications n'auraient aucun sens. Il s'agit donc de déterminer pour chacun des capteurs sa position.

En général, la localisation consiste à trouver la localité (ou position) d'un ou plusieurs objets par rapport à un ensemble de positions de référence connus. Dans certains environnements ruraux et préurbains le GPS est utilisé pour localiser les objets, cependant, pour les milieux urbains et à l'intérieur, le GPS ne fonctionne pas efficacement. Par conséquent, dans ces dernières années, les réseaux de capteurs sans fil sont couramment utilisés pour localiser les objets dans les environnements intérieurs.

Certaines caractéristiques physiques sont largement discutées pour estimer la distance entre les objets, comme le temps d'arrivée (ToA), différence de temps d'arrivée (TDoA), l'angle d'arrivé (AoA) et l'indicateur de la puissance du signal à la réception (RSSI).

Les systèmes de localisation qui utilise le RSSI comme métrique de distance donnent de mauvais résultats dans les milieux fermés, à cause de grand nombre d'obstacles qui influent sur la valeur de RSSI mesurée. Donc il existe d'autres méthodes plus compatibles avec ce type d'environnement comme la prise d'empreintes digitales (fingerprinting).

Le principe de la prise d'empreintes digitales (fingerprinting) est de créer une base de données qui contient les informations RSSI pour des nœuds dont les positions sont connues. La position de la cible est estimée en comparant son RSSI avec la base de données, le k-ppv (k plus proches voisins) est souvent utilisée pour trouver les voisins les plus proches.

Ce mémoire est composé de trois chapitres :

- Chapitre 1 : est consacré aux généralités sur les réseaux de capteurs sans fil et leurs domaines d'applications.
- Chapitre 2 : sera consacré aux systèmes de localisation, leurs propriétés et contraintes dans les réseaux de capteurs sans fil, les techniques de mesure de distance inter capteurs et les méthodes de positionnement notamment le fingerprinting.
- Chapitre 3 : est consacré à la création d'un projet de localisation pour un réseau de capteurs sans fil (RCSF) avec la méthode de fingerprining en utilisant le k-ppv comme technique de recherche de voisins, une simulation suivie par deux expérimentations dans deux environnements différents seront fait pour étudier les

différents paramètres qui influent sur l'efficacité du programme de localisation proposé dans ce mémoire. En sortant par une borne d'erreur sur les positions.

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

Chapitre 1

Introduction aux Réseaux de Capteurs Sans-Fil

SOMMAIRE

1.1. INTRODUCTION ---------- 5
1.2. LES RESEAUX AD HOC ---------- 5
1.2.1. Définition des Réseaux Ad hoc ---------- 5
1.2.2. Applications des Réseaux Ad Hoc ---------- 6
1.3. RESEAUX DE CAPTEURS SANS-FIL ---------- 6
1.3.1. Anatomie d'un Nœud Capteur ---------- 6
1.3.2. Architecture d'un RCSF ---------- 7
1.4. LES BASES DE ZIGBEE ---------- 9
1.4.1. C'est quoi Zigbee ---------- 9
1.4.2. Topologies dans le Réseau Zigbee ---------- 10
1.4.3. Les Principes de Communication de Zigbee et IEEE802.15.4 ---------- 11
1.4.4. Les Couches de Zigbee et IEEE 802.15.4 ---------- 14
1.5. DOMAINES D'APPLICATION DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL ---------- 15
1.5.1. Applications Militaires ---------- 15
1.5.2. Applications Liées à la Sécurité ---------- 16
1.5.3. Applications Environnementales ---------- 17
1.5.4. Applications Médicales ---------- 18
1.5.5. Applications Ecologiques ---------- 18
1.5.6. Applications de Traçabilité et de Localisation ---------- 18
1.5.7. Applications Commerciales ---------- 18

1.1. Introduction

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est un réseau ad hoc avec un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique, appelée « champ de captage » correspondant au terrain d'intérêt pour le phénomène capté [8].

Dans ce premier chapitre, nous présentons un ensemble de généralités sur les réseaux de capteurs sans fil, nous allons commencer par une présentation sur les réseaux ad hoc, nous parlerons dans un deuxième temps sur les bases des RCSFs, les différents composants d'un nœud capteur et leurs fonctions, l'architecture d'un RCSF, les bases de communication, les topologies utilisées et les couches protocolaires, on terminera par les différents domaines d'application des RCSFs.

1.2. Les Réseaux Ad hoc

1.2.1. Définition des Réseaux Ad hoc

Un réseau mobile ad hoc (figure 1.1), appelé généralement MANET (Mobile Ad hoc NETwork), consiste en une grande population, relativement dense, d'unités mobiles qui se déplacent dans un territoire quelconque. Le seul moyen de communication est l'utilisation « des ondes radio » qui se propagent entre les différents nœuds mobiles, sans l'aide d'une infrastructure préexistante ou d'administration centralisée [1].

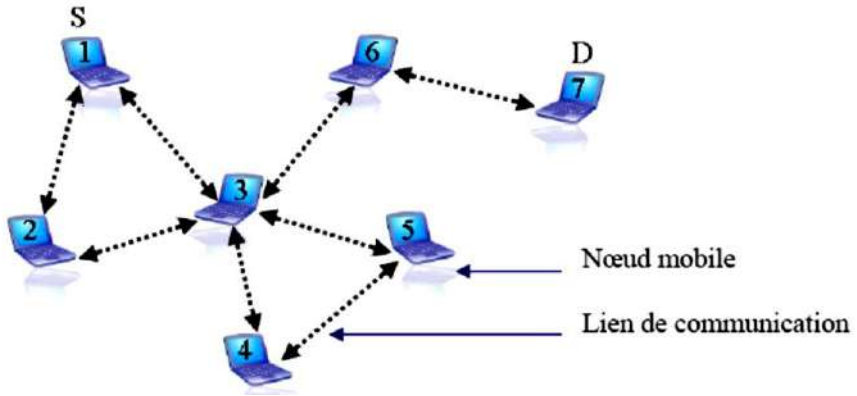


Figure 1.1: Un réseau Ad Hoc.

La distribution des nœuds dans le réseau peut changer à tout moment, elle est donc dynamique et imprévisible ce qui fait que la déconnexion des unités soit très fréquente (figure 1.2).

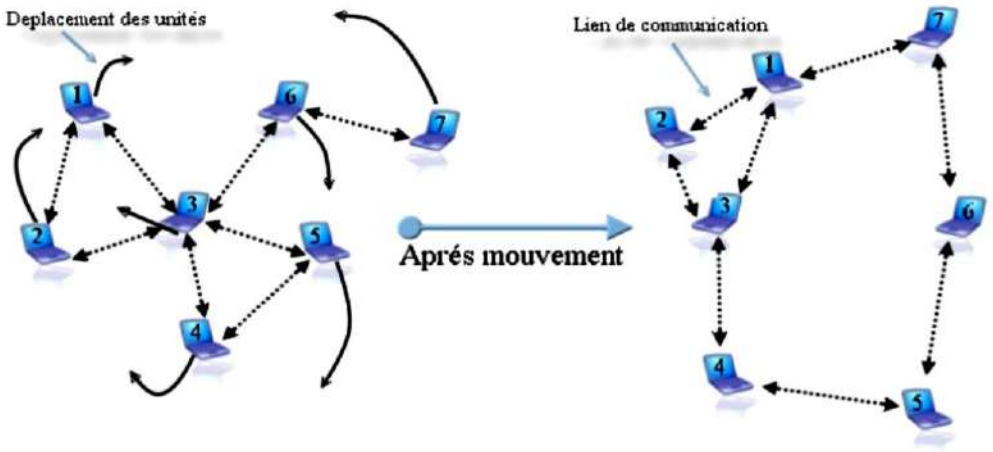


Figure 1.2: Le changement de l'emplacement des nœuds dans les réseaux Ad Hoc.

1.2.2. Applications des Réseaux Ad Hoc

Les applications ayant recours aux réseaux ad hoc couvrent un très large spectre, incluant les applications militaires et de tactique, l'enseignement à distance, les opérations de secours, etc... [21].

D'une façon générale, les réseaux ad hoc sont utilisés dans toutes les applications où le déploiement d'une infrastructure réseau filaire est trop contraignant, soit parce qu'il est difficile de le mettre en place, soit parce que la durée d'exploitation du réseau ne justifie pas de câblage à demeure [1].

1.3. Réseaux de Capteurs Sans-Fil

Un réseau de capteurs Sans Fil (RCSF) est un type spécial de réseau ad hoc où l'infrastructure de communication et l'administration centralisée sont absentes [21].

Il est constitué d'un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil [2].

1.3.1. Anatomie d'un Nœud Capteur

Comme illustré à la Figure 1.3, un capteur sans fil est typiquement composé de quatre modules de base [8] :

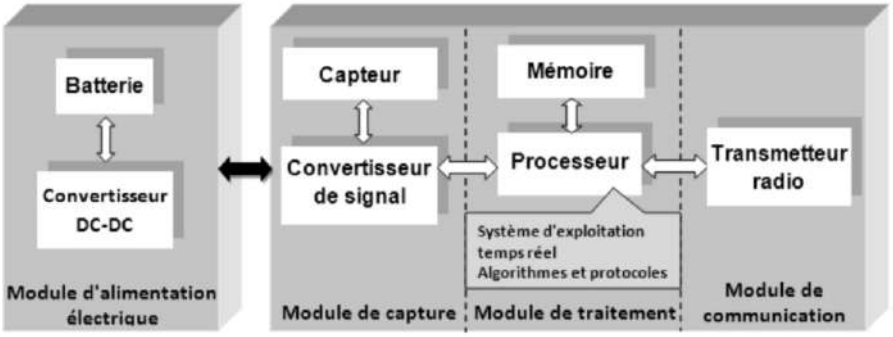


Figure 1.3: Architecture typique d'un capteur sans fil

1. **Un module de capture** (e.g, thermomètre dans le cas de données thermiques, caméra dans le cas de signaux vidéo, etc.) qui détecte le phénomène physique, et transforme le signal détecté en signal numérique à l'aide d'un convertisseur de signal.

2. **Un module de traitement**, qui récupère le signal capté et effectue des opérations (généralement simples, à faible consommation énergétique) sur les données collectées.

3. **Un module de transmission radio** (à faible portée) il est composé d'un émetteur/récepteur pour assurer toutes les émissions et réceptions de données.

4. **Un module d'alimentation**, il est responsable de la gestion de l'énergie et de l'alimentation de tous les composants du capteur. Il consiste, généralement, en une batterie qui est limitée et irremplaçable, ce qui rend l'énergie comme principale contrainte pour un capteur.

1.3.2. Architecture d'un RCSF [3]

La Figure 1.4 illustre la variante des réseaux ad hoc que sont les RCSF. Un RCSF est composé de capteurs généralement déployés en grand nombre et munis de transmetteurs sans fil. Chaque capteur est susceptible de collecter des données (traitées ou pas) de l'environnement et de les acheminer vers un centre de traitement par l'intermédiaire d'une passerelle ("sink" ou "gateway") et ceci en un ou plusieurs sauts. La passerelle peut être fixe ou mobile et transmet ensuite ces données à un gestionnaire de tâches au centre de traitement (CT) via Internet ou par satellite. Le CT pourrait être un simple ordinateur central dont le rôle est l'analyse des données rapportées, et la prise de décisions. Le CT effectue certaines opérations sur les données, comme le filtrage et l'agrégation pour en extraire l'information utile. Les capteurs sont déployés en général par centaines ou milliers, avec une densité de nœuds généralement de l'ordre de 20

nœuds/m3. La transmission de l'information entre capteurs peut s'effectuer à l'aide d'un support radio, infrarouge, ou optique.

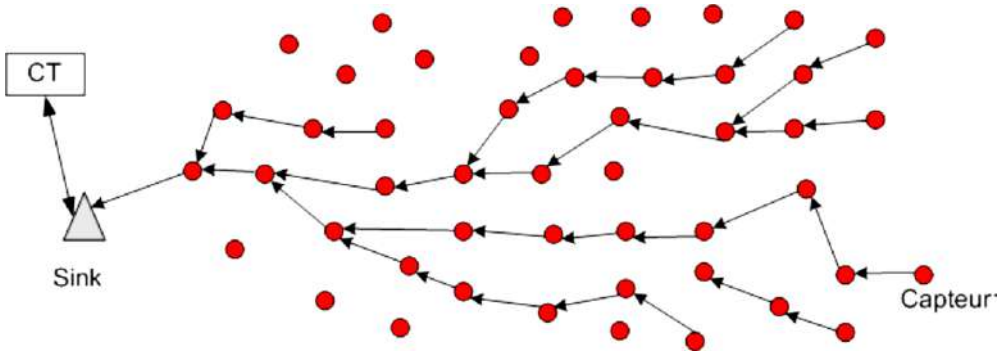


Figure 1.4: Architecture d'un RCSF

Parfois, les capteurs peuvent cohabiter avec des dispositifs plus riches en ressources de toute sorte (puissance de calcul, longue portée de transmission, batterie durable), appelés acteurs, ce qui donne lieu à l'architecture de la Figure 1.5 illustrant les réseaux de capteurs et d'acteurs sans fil (RCASF).

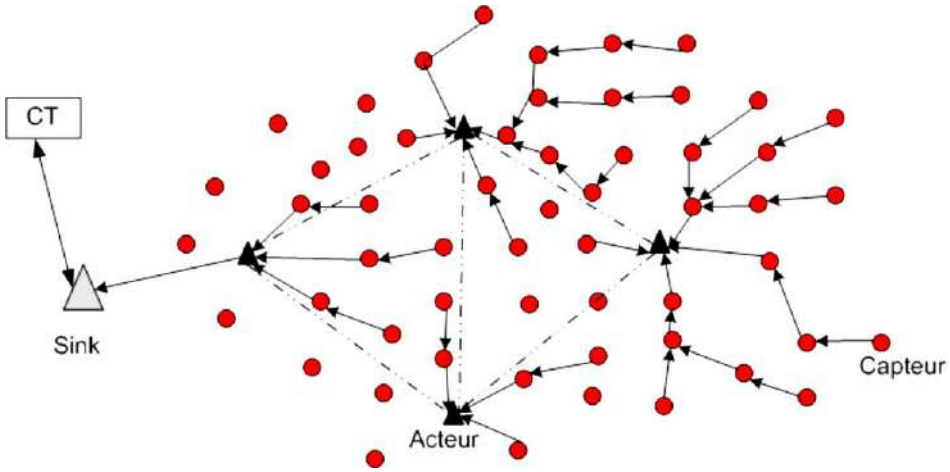
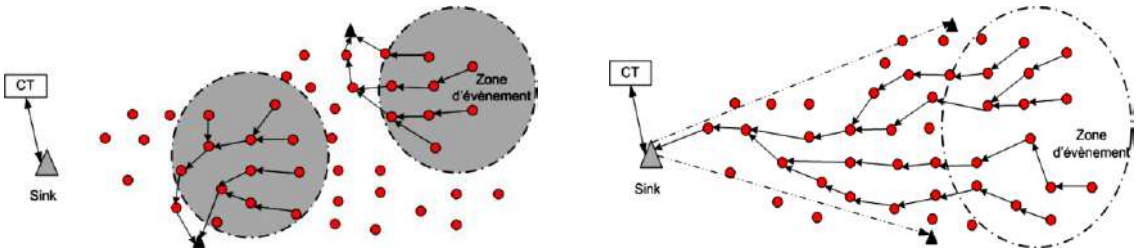


Figure 1.5: Architecture générique d'un RCASF

Des coopérations s'établissent entre capteurs et acteurs mais aussi entre acteurs pour faciliter la gestion d'événements à l'aide d'architectures illustrées à la Figure 1.6. Dans l'architecture automatique (Figure 1.6(a)), les capteurs rapportent les événements détectés aux acteurs qui traitent les données rapportées et initient les actions appropriées. Quant à la Figure 1.6(b), elle illustre l'architecture semi-automatique dans laquelle les capteurs rapportent les événements détectés au Sink qui initient les commandes appropriées aux acteurs.



(a) Architecture automatique (c) Architecture semi-automatique

Figure 1.6: Les différents types d'architecture des RCASF

Généralement, dans les RCSF, la nature des données collectées et acheminées par les capteurs est beaucoup plus importante que l'identité des capteurs: on dit que les RCSF sont *data-centric*. Les données sont requises soit par le Sink, soit par un acteur dans le réseau sur la base d'attributs: on parle alors *d'adressage par attributs*. Ce type d'adressage permet de trouver des routes de plusieurs sources vers une seule destination. Pour cela, les données des événements détectés sont décrites par une liste de paires attribut-valeur.

1.4. Les Bases de Zigbee

Parmi les standards les plus aptes à être exploités dans les réseaux de capteurs sans-fil se retrouvent la double pile protocolaire Bluetooth/Zigbee [22].

Le Bluetooth, a été standardisé sous la norme IEEE 802.15.1 et a comme but la création et le maintien de réseaux à portée personnelle. Un tel réseau est utilisé pour le transfert de données à bas débit à faible distance entre appareils compatibles [22]. Malheureusement, le grand défaut de cette technique est sa trop grande consommation d'énergie et ne peut donc pas être utilisée par des capteurs qui sont alimentés par une batterie et qui idéalement devraient fonctionner durant plusieurs années [4].

Le ZigBee combiné avec IEEE 802.15.4 offre des caractéristiques répondant encore mieux aux besoins des réseaux de capteurs en termes d'économies d'énergie. ZigBee offre des débits de données moindres, mais il consomme nettement moins que Bluetooth [4].

1.4.1. C'est quoi Zigbee [4]

ZigBee est une norme qui définit un ensemble de protocoles de communication à faible débit et de courte portée dans les réseaux sans fil. Les périphériques sans fil basés sur ZigBee fonctionnent en 868 MHz, 915 MHz et 2,4 GHz. Le débit maximal est de 250 Kbits par seconde. ZigBee est principalement destiné aux applications fonctionnant sur batterie où le faible débit, le faible coût, et la longue durée de vie de batterie ; sont

des exigences principales. Dans de nombreuses applications ZigBee, le temps total où le périphérique sans fil est engagé dans tout type d'activités est très limité, l'appareil dépense la majeure de son temps dans un mode d'économie d'énergie, aussi connu comme le mode veille. Par conséquence, les appareils compatibles ZigBee sont capables d'être opérationnels pendant plusieurs années avant que leurs piles doivent être remplacées.

Le standard ZigBee est développé par l'Alliance ZigBee, qui a des centaines de sociétés membres, de l'industrie des semi-conducteurs et des développeurs de logiciels, aux fabricants et installateurs des équipements d'origine (OEMs). La norme ZigBee a adoptée l'IEEE 802.15.4 comme son couche physique et ces protocoles de contrôle d'accès au support (MAC).

1.4.2. Topologies dans le Réseau Zigbee [23]

Intéressons-nous tout d'abord aux formes de réseaux traditionnels (figure 1.7) : centralisées, décentralisées et distribuées. Un réseau centralisé: tous les clients se connectent à un serveur centralisé ; un réseau décentralisé serait le réseau d'une banque régionale : chaque banque se connecte au serveur de sa région, lequel se connecte au serveur central national ; et enfin, le serveur distribué (ou acentré) serait le réseau P2P où chaque nœud du réseau agit comme client et serveur.

Le protocole ZigBee, lui, peut utiliser ces trois topologies réseau (figure 1.8) : on parle de réseau :

1. en étoile (Star) ou centralisé,
2. en arbre (Cluster Tree Mesh) ou décentralisé,
3. maillé (Traditional Mesh) ou distribué.

Les nœuds du réseau ZigBee possèdent des fonctions bien définies :

- PAN Coordinator (Maître) : un seul coordinateur existe au sein d'un réseau ZigBee. Son rôle est de stocker l'information sur le réseau et de déterminer le chemin optimal entre deux points du réseau.
- FFD (Routeur, Répéteur): ce nœud transmet l'information entre les différents nœuds. Il peut être un routeur ou un répéteur.
- RFD (Terminal): ce nœud correspond au terminal en périphérie du réseau ayant la possibilité de communiquer avec son nœud-parent.

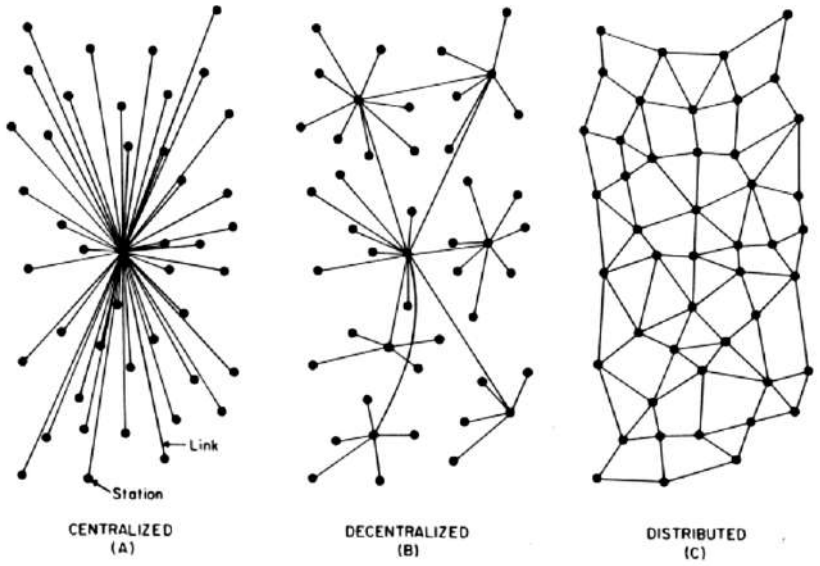


Figure 1.7 Architectures réseaux existantes.

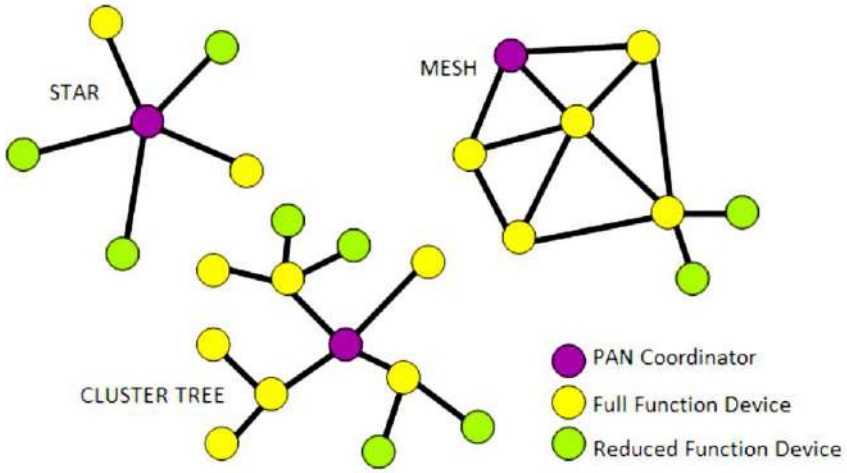


Figure 1.8 Topologies ZigBee.

1.4.3. Les Principes de Communication de Zigbee et IEEE802.15.4 [4]

Cette section examine quelques notions de base de communication, telle que la méthode d'accès multiple, les méthodes de transfert de données et l'adressage dans IEEE 802.15.4 et ZigBee.

1.4.3.1. CSMA-CA

IEEE 802.15.4 implémente une méthode simple pour permettre à plusieurs périphériques d'utiliser le même canal de fréquence comme leur support de communication. Le mécanisme d'accès au canal utilisé est le CSMA-CA (*Accès multiple à détection de porteuse avec évitement de collision*). En CSMA-CA, à tout moment où un dispositif veut transmettre, il effectue d'abord une évaluation du canal (***C****lear* ***C****hannel* ***A****ssessment* : CCA) afin de s'assurer que le canal n'est pas en cours d'utilisation par un autre périphérique. Ensuite le dispositif commence la transmission de son propre signal. La décision si un canal est libre ou non peut être basée sur la mesure de l'énergie spectrale du canal de fréquence d'intérêt ou de détecter le type de signal d'occupation.

1.4.3.2. Méthodes de Transfert de Données

Il existe trois types de transfert de données dans l'IEEE 802.15.4:

- ✓ Transfert de données à un coordonnateur à partir d'un périphérique (Figure 1.9)**.**
- ✓ Transfert de données à partir d'un coordonnateur à un périphérique (Figure 1.10)**.**
- ✓ Transfert de données entre deux périphériques peer**.**

Toutes ces trois méthodes peuvent être utilisées dans une topologie peer-to-peer. Dans une topologie en étoile, seuls les deux premiers sont utilisés, car aucun lien direct peer-to-peer est autorisée.

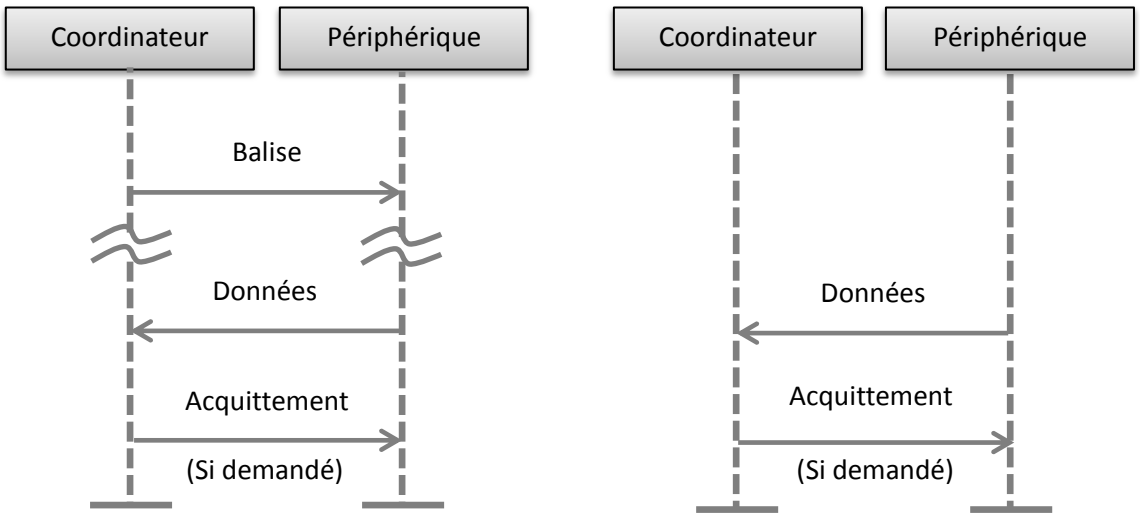


Figure 1.9 : Transfert de données à un coordonnateur dans IEEE 802.15.4: (a) balise activé, et (b) pas de balise Activé

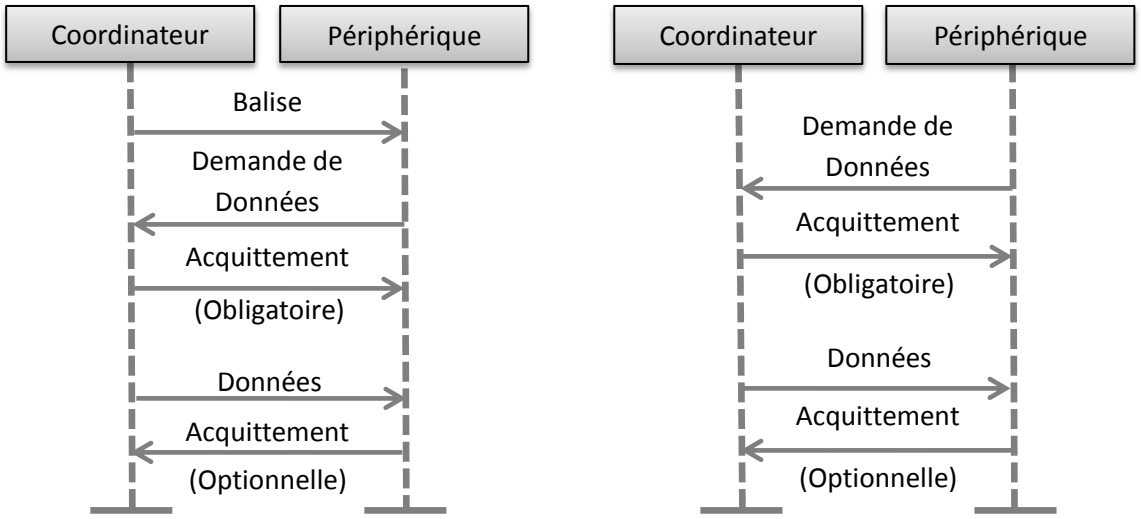


Figure 1.10: Transfert de données à partir d'un coordonnateur à un périphérique: (a) balise activé, et (b) pas de balise Activé

1.4.3.3. Vérification de Données

Un paquet est un ensemble de bits transmis avec un format spécifique. Le récepteur doit disposer d'un mécanisme pour vérifier si l'un des bits reçus est erroné. IEEE 802.15.4 utilise une séquence de contrôle de trame de 16-bit (***F**rame **C**heck **S**equence* : FCS) basée sur le contrôle par redondance cyclique (***C**yclic **R**edundancy **C**heck* : CRC) de l'Union internationale des télécommunications (UIT) pour détecter des erreurs éventuelles dans le paquet de données.

1.4.3.4. Adressage

Chaque périphérique dans un réseau a besoin d'une adresse unique. IEEE 802.15.4 utilise deux types d'adressage:

- ✓ Adressage court à 16-bits.
- ✓ Adressage étendu à 64-bit.

Un réseau peut choisir d'utiliser soit un adressage de 16-bit ou un autre de 64-bit. L'adresse courte permet la communication au sein d'un seul réseau. L'utilisation du mécanisme d'adressage court permet de réduire la longueur des messages et économise alors l'espace mémoire requis allouée au stockage des adresses. La combinaison d'un identifiant PAN et d'une adresse courte peut être utilisée pour la communication entre réseaux indépendants.

La disponibilité de l'adressage 64-bit signifie que le nombre maximal de dispositifs dans un réseau peut être 2^{64}, soit environ $1{,}8 * 10^{19}$. Par conséquent, un réseau sans fil

IEEE 802.15.4 pratiquement n'a pas de limite sur le nombre d'appareils qui peuvent rejoindre le réseau.

1.4.4. Les Couches de Zigbee et IEEE 802.15.4 [4]

Cette section donne un aperçu fonctionnel des couches protocolaires de ZigBee et IEEE 802.15.4.

1.4.4.1. La Couche Physique

Dans les réseaux sans fil ZigBee, la couche de protocole la plus basse est la couche physique IEEE 802.15.4 (Figure 1.11). Cette couche est la couche la plus proche au matériel, elle contrôle et communique directement avec l'émetteur-récepteur radio. Elle est responsable à l'activation de la radio qui transmet ou reçoit les paquets. La couche physique sélectionne également la fréquence du canal et s'assure que le canal n'est pas actuellement utilisé par d'autres appareils sur un autre réseau.

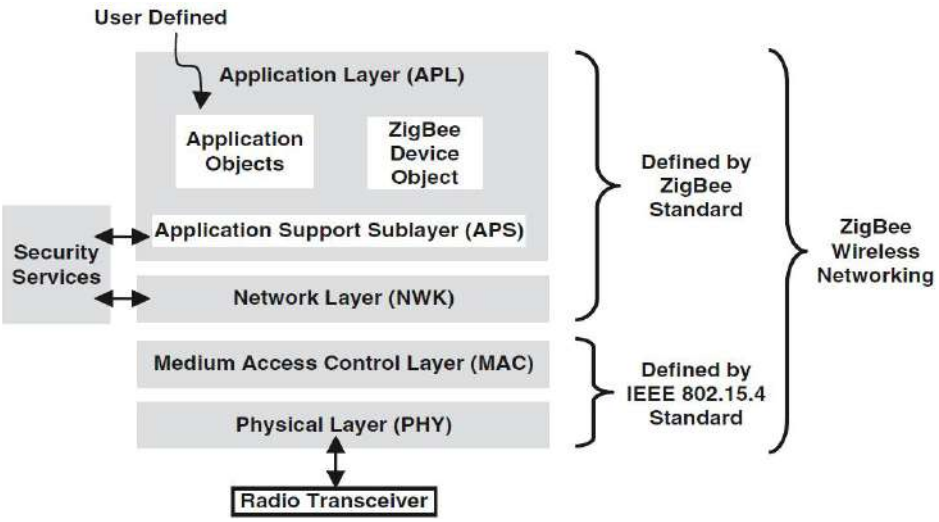


Figure 1.11 : les couches de protocole du réseau sans fil ZigBee

1.4.4.2. La Couche MAC

La couche MAC (***M**edium **A**ccess **C**ontrol*) assure l'interface entre la couche physique et la couche réseau.

1.4.4.3. La Couche Réseau

Les interfaces de la couche réseau située entre la couche MAC et la couche application sont responsables de la gestion de la formation du réseau et du routage. Le routage est le processus de sélection de la voie par laquelle le message sera relié à son périphérique de destination. Le coordinateur et les routeurs ZigBee sont responsables de

la découverte et du maintien des routes dans le réseau. Un terminal ZigBee ne peut pas effectuer une découverte de la route. Le coordinateur ou le routeur ZigBee effectuera la découverte de la route pour le terminal. La couche réseau d'un coordinateur ZigBee est chargée d'établir un nouveau réseau et de sélectionner la topologie du réseau (arbre, étoile, ou maillée). Le coordinateur ZigBee affecte également les adresses aux dispositifs de son réseau.

1.4.4.4. La Couche Application

La couche application est la couche de protocole la plus élevée dans le réseau sans fil ZigBee et accueille les objets d'application. Les fabricants ont développé les objets d'application pour adapter un dispositif avec diverses applications. Les objets d'application contrôlent et gèrent les couches de protocoles dans un dispositif ZigBee. Il peut y avoir jusqu'à 240 objets d'application dans un seul dispositif.

La norme ZigBee offre la possibilité d'utiliser des profils d'application dans le développement d'une application. Un profil d'application est un ensemble des accords sur les formats de message et le traitement des actions pour une application spécifique. L'utilisation d'un profil d'application permet une plus grande interopérabilité entre les produits développés par différents fournisseurs pour une application spécifique. Si deux fournisseurs utilisent le même profil d'application pour développer leurs produits, le produit d'un fournisseur sera en mesure d'interagir avec les produits fabriqués par l'autre fournisseur.

1.5. Domaines d'Application des Réseaux de Capteurs Sans Fil

Les RCSF peuvent avoir beaucoup d'applications (voir figure 1.12). Parmi elles, nous citons :

1.5.1. Applications Militaires

Le déploiement rapide, l'auto-configuration et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Déploiement sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller toutes les activités des forces ennemies ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (par la détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations, par exemple) [21] [7].

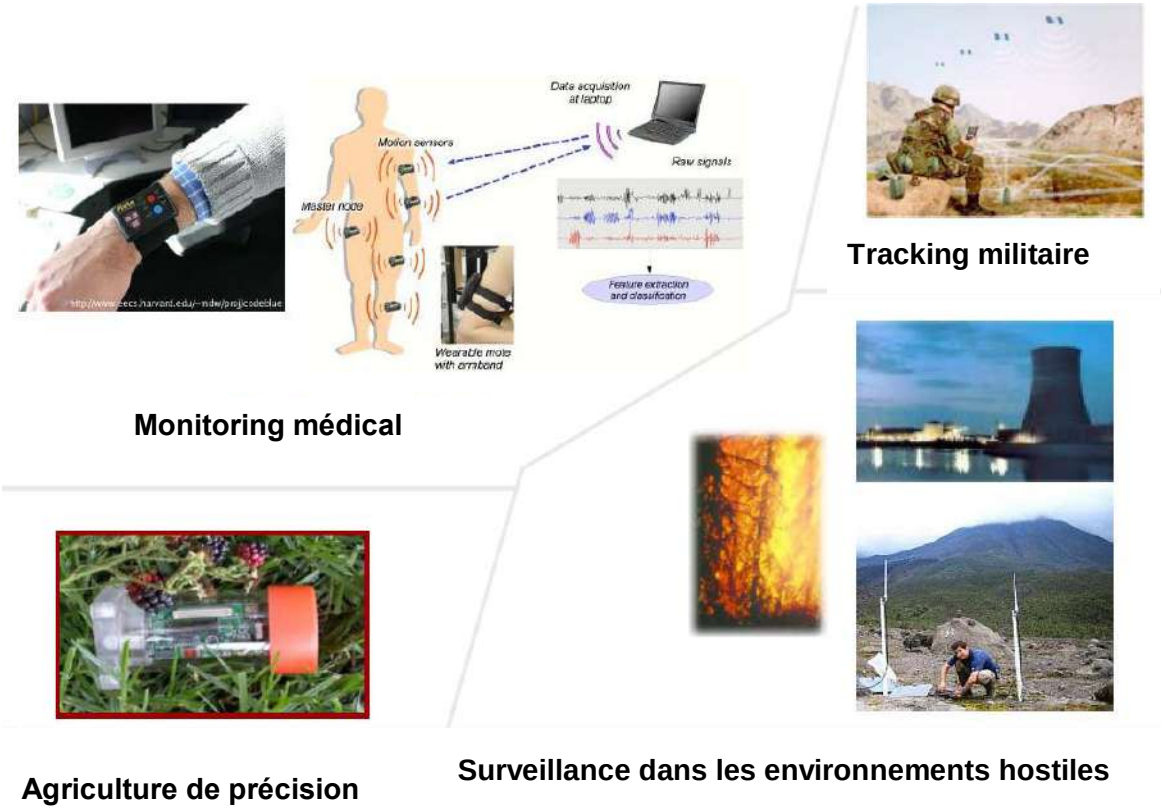


Figure 1.12 : Applications des RCSF [8]

1.5.2. Applications Liées à la Sécurité

Les altérations dans la structure d'un bâtiment, suite à un séisme ou au vieillissement, pourraient être détectées par des capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton, sans alimentation électrique ou autres connexions filaires. Les capteurs doivent s'activer périodiquement et peuvent ainsi fonctionner durant des années, voire des décennies. Un réseau de capteurs de mouvements peut constituer un système d'alarme distribué qui servira à détecter les intrusions sur un large secteur.

Déconnecter le système ne serait plus aussi simple, puisqu'il n'existe pas de point critique. La surveillance de voies ferrées pour prévenir des accidents avec des animaux et des êtres humains peut être une application intéressante des réseaux de capteurs. La protection des barrages pourrait être accomplie en y introduisant des capteurs. La détection prompte de fuites d'eau permettrait d'éviter des dégâts. Les êtres humains sont conscients des risques et attaques qui les menacent. Du coup, ils mettent à disposition toutes les ressources humaines et financières nécessaires pour leur sécurité.

Cependant, des failles sont toujours présentes dans les mécanismes de sécurisation appliqués aujourd'hui, sans oublier leur coût très élevé. L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité pourrait diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et à la protection des êtres humains tout en garantissant de meilleurs résultats [7] [5].

1.5.3. Applications Environnementales

Des thermo-capteurs dispersés à partir d'un avion sur une forêt peuvent signaler un éventuel début d'incendie dans le champ de captage; ce qui permettra une meilleure efficacité pour la lutte contre les feux de forêt. Dans les champs agricoles, les capteurs peuvent être semés avec les graines. Ainsi, les zones sèches seront facilement identifiées et l'irrigation sera donc plus efficace. Sur les sites industriels, les centrales nucléaires ou dans les pétroliers, des capteurs peuvent être déployés pour détecter des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.) et alerter les utilisateurs dans un délai suffisamment court pour permettre une intervention efficace. Une grande quantité de capteurs peut être déployée en forêt ou dans un environnement de conservation de la faune afin de recueillir des informations diverses sur l'état du milieu naturel et sur les comportements de déplacement.

Par exemple, l'université de Pise en Italie a réalisé des réseaux de capteurs pour le contrôle des parcs naturels (feux, animaux,..). Il est ainsi possible "d'observer", sans déranger, des espèces animales difficiles à étudier dans leur environnement naturel et de proposer des solutions plus efficaces pour la conservation de la faune. Les éventuelles conséquences de la dispersion en masse des micro-capteurs dans l'environnement ont soulevé plusieurs inquiétudes. En effet, chaque micro-capteur est doté d'une batterie qui contient des métaux nocifs. Néanmoins, le déploiement d'un million de capteurs de 1 millimètre cube chacun ne représente qu'un volume total d'un litre. Même si tout ce volume était constitué de batteries, cela n'aurait pas des répercussions désastreuses sur l'environnement.

Dans les immeubles, le système de climatisation peut être conçu en intégrant plusieurs micro-capteurs dans les tuiles du plancher et les meubles. Ainsi, La climatisation pourra être déclenchée seulement aux endroits où il y a des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire. Le système distribué pourra aussi maintenir une température homogène dans les pièces. Utilisée à grande échelle, une telle application permettrait de réduire la demande mondiale en énergie réduisant du même coup les gaz à effet de serre. Rien que pour les États-Unis, on estime cette économie à 55 milliards de dollars par an avec une diminution de 35 millions de tonnes des émissions de carbone dans l'air. Ainsi, dans un contexte mondial où le réchauffement de

la planète devient une préoccupation grandissante, une telle conséquence environnementale serait un pas dans la bonne direction [6].

1.5.4. Applications Médicales

Surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité facilitant ainsi le diagnostic de maladies grâce à des micro-capteurs qui pourront être ingères ou implantés sous la peau.

1) les micros-cameras qui peuvent être ingérées et sont capables, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain [21],

1) la création d'une rétine artificielle composée d'une centaine de micro-capteurs pour améliorer la vision de l'œil [21].

1.5.5. Applications Ecologiques

L'intégration de plusieurs micro-capteurs dans le système de climatisation et de chauffage des immeubles. Ainsi, la climatisation ou le chauffage ne sont déclenches qu'aux endroits où il y a des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire. Le système distribué peut aussi maintenir une température homogène dans les pièces. Utilisée à grande échelle, une telle application permettrait probablement de réduire la demande mondiale en énergie [7].

1.5.6. Applications de Traçabilité et de Localisation

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

1.5.7. Applications Commerciales

Il est possible d'intégrer des nœuds capteurs au processus de stockage et de livraison. Le réseau ainsi formé, pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un paquet, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la position actuelle du paquet. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré [6].

Chapitre 2

Théorie de Localisation dans les RCSFs

SOMMAIRE

2.1. INTRODUCTION ---- 20
2.2. LA NECESSITE DE LA LOCALISATION DANS LES RCSFS ---- 20
2.3. CONTRAINTES POUR UN SYSTEME DE LOCALISATION ---- 21
2.3.1. Auto-Organisation : ---- 21
2.3.2. Evolutivité (extensibilité, échelle) : ---- 22
2.3.3. Robustesse ---- 22
2.3.4. Efficacité dans l'Utilisation des Ressources du RCSF : ---- 22
2.4. PROPRIETES D'UN SYSTEME DE LOCALISATION ---- 23
2.4.1. Position Physique et/ou Symbolique ---- 23
2.4.2. Coordonnées Absolues ou Relatives ---- 23
2.4.3. Calcul Centralisé ou Distribué ---- 23
2.4.4. Exactitude et Précision ---- 24
2.4.5. Echelle ---- 24
2.4.6. Limites ---- 24
2.4.7. Coût ---- 24
2.5. LES SYSTEMES DE LOCALISATION ---- 25
2.6. MESURE DE DISTANCE DANS LES SYSTEMES DE LOCALISATION ---- 25
2.6.1. Temps d'Arrivée (ToA) ---- 25
2.6.2. Différence de Temps d'Arrivée (TDoA) ---- 26
2.6.3. Indicateur de Puissance du Signal Reçu (RSSI) ---- 27
2.6.4. L'Angle d'Arrivée (AoA) ---- 28
2.7. SOURCES D'ERREUR DANS LA LOCALISATION BASEE SUR RSSI ---- 29
2.8. LES TECHNIQUES DE LOCALISATION DANS LES RCSFS ---- 30
2.8.1. Trilatération ---- 31
2.8.2. Triangulation ---- 31
2.8.3. Fingerprinting (Prise d'Empreintes Digitales) ---- 32
2.9. LA RECHERCHE DES PLUS PROCHES VOISINS ---- 36
2.9.1. Algorithme de *k*-ppv ---- 38

2.1. Introduction

L'une des applications des réseaux sans fil à courte portée est la détermination approximative de la position physique des objets à n'importe quel moment. La connaissance en temps réel de l'emplacement du personnel, des actifs et des périphériques portables peut augmenter l'efficacité de la gestion.

L'estimation de la position fait référence au processus d'obtention de l'information de l'emplacement d'un nœud par rapport à un ensemble de positions de référence connus. L'estimation de la position est aussi appelé le positionnement, la localisation ou la géolocalisation. La connaissance de l'emplacement des nœuds offre la possibilité de fournir des services dépendant du lieu. Par exemple, un visiteur dans un musée peut porter un appareil audio / vidéo qui lui fournit des informations pertinentes, en fonction de son endroit dans la musée. L'emplacement d'un nœud peut être aussi utilisé dans le cadre du processus d'authentification. De cette façon, l'authenticité d'un paquet est déterminée non seulement par les informations incorporées dans le paquet, mais aussi par l'emplacement du nœud qui a transmis ce paquet.

Ce chapitre se concentre sur la théorie des méthodes de positionnement employées dans les réseaux de capteurs sans fil et leurs importances. Nous allons citer les différents propriétés et contraintes pour un système de localisation, ensuite, nous allons parler sur les différentes techniques de mesure de distances inter-capteurs et les méthodes de positionnement tel que la trilatération, la triangulation, et le fingerprinting, ce dernier prendra la partie majoritaire de l'explication.

2.2. La Nécessité de la Localisation dans les RCSFs

Les positions des capteurs peuvent être prédéterminées et préconfigurées. Mais, en général, les capteurs ont un déploiement aléatoire, car ils sont utilisés sur des terrains inaccessibles, embarqués sur des engins mobiles ou sur le lieu d'un désastre ou leur nombre (très grand) ne permet pas de préconfigurer la position. Pour cela, un système de localisation est nécessaire afin de fournir aux nœuds leurs positions.

Les systèmes de localisation sont identifiés comme une clé technologique pour le développement et l'utilisation des RCSF. Cependant, leur utilisation n'est pas exclusive aux RCSF [15].

La localisation est importante pour plusieurs aspects, parmi lesquels :

- ✓ **La localisation permet un routage efficace:** Un réseau de capteurs typique possède un grand nombre de nœuds qui communiquent à très courte distance (quelques mètres). Les données collectées par un nœud doivent être transmis au

sink par l'intermédiaire de plusieurs autres nœuds. Par conséquent, le routage par multi-sauts est indispensable. Afin d'implémenter un routage par multi-sauts, il est nécessaire que les nœuds soient conscients de leurs positions, notamment, ils doivent connaitre leur position relative par rapport à leurs voisins. Par conséquent la localisation devient très importante [16] [15].

- ✓ **La localisation fournit une économie d'énergie:** Supposons que nous avons déployé un réseau de capteurs pour la surveillance de la pollution. Maintenant, les nœuds de capteurs voisins auront des données qui ne seront pas radicalement différentes l'un de l'autre. Donc, pour économiser l'énergie, il est logique de combiner les données à partir des nœuds voisins, puis communiquer cet ensemble réduit et combiné de données, en conservant alors de l'énergie (puisque la communication prend beaucoup plus d'énergie que le traitement local). Afin de faire la fusion des données locales, nous aurons besoin des informations de la localisation. Et une fois de plus la localisation devient vitale [16] [15].

- ✓ **La localisation assiste dans les applications de poursuite des cibles:** Dans cette application, nous avons généralement besoin de déterminer la portée, la vitesse et la direction de la cible. Les capteurs sont déployés dans une région où ils détectent ces paramètres à partir de la cible en mouvement. Enfin pour calculer l'orientation globale de la cible, il est nécessaire de connaitre l'emplacement des nœuds capteurs. Une fois encore la localisation devient nécessaire [16] [15].

- ✓ **La localisation est utile pour localiser la source des données:** Dans de nombreuses applications, un réseau de capteurs à base d'événements est utilisé. Ici, les nœuds sont généralement en mode veille et quand un événement se produit (des vibrations soudaines ont lieu) les nœuds se réveillent et détectent et transmettent les données. Ces données n'ont pas d'importance si on ne connait pas leur emplacement, et donc la localisation devient nécessaire [16] [15].

2.3. Contraintes pour un Système de Localisation [15]

Un système de localisation doit respecter un ensemble de contraintes imposées par les spécificités des RCSF dû à leurs limitations (ressources matérielles : puissance du processeur, mémoire, énergie) et applications. Parmi ces contraintes :

2.3.1. Auto-Organisation :

Les RCSF sont utilisés dans des applications diverses. Dans plusieurs applications (si ce n'est pas la majorité des cas) le RCSF est indépendant de toute infrastructure ce

qui implique que l'algorithme de localisation doit être distribué. Dans le reste des cas, l'algorithme de localisation peut être centralisé.

2.3.2. Evolutivité (extensibilité, échelle) :

L'algorithme de localisation peut être appliqué aussi bien à un RCSF dense qu'à un RCSF avec un nombre réduit de nœuds. La plupart des algorithmes de localisation sont sensibles à la densité des nœuds ; s'il n'y a pas assez de nœuds l'algorithme donne des résultats imprécis.

2.3.3. Robustesse

L'algorithme de localisation doit être tolérant aux problèmes de communication ainsi qu'aux imprécisions des distances et des positions (des ancres) dues notamment aux faits suivants :

- Les liens de communications entre deux nœuds sont asymétriques. En effet, la communication entre deux nœuds peut passer dans un sens, sans pour autant passer dans l'autre sens.
- Les ondes radio ne se propagent pas de la même façon dans tous les milieux. Elles se propagent différemment sur l'herbe (gazon), sable ou sur l'asphalte (réflexion et absorption).
- Les obstacles (environnants) et les irrégularités du terrain : Les obstacles peuvent cacher les nœuds ce qui donne de mauvaises mesures et par conséquent une mauvaise localisation.
- Topologie non convexe : Les coordonnées des nœuds qui se trouvent dans les extrémités d'un RCSF sont souvent moins précises à cause du manque de mesure de distances. En effet, il n'y a pas assez de nœuds dans le voisinage et de plus tous les nœuds accessibles sont dans le même côté. Exemple : Si les capteurs sont distribués sur un champ rectangulaire, les capteurs qui se trouvent près des quatre coins (angles) du rectangle seront mal localisés.

2.3.4. Efficacité dans l'Utilisation des Ressources du RCSF :

Même si le système de localisation est indispensable pour le bon fonctionnement du RCSF, il n'est pas le but principal du réseau. Il doit utiliser les ressources du capteur d'une manière efficace pour ne pas les épuiser. Les concepteurs des algorithmes de localisation doivent minimiser les coûts en termes d'énergie, matériel et déploiement de leurs algorithmes de localisation.

2.4. Propriétés d'un Système de Localisation [15]

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

2.4.1. Position Physique et/ou Symbolique

Cette propriété définit le fait que le système de localisation fournit aux nœuds des positions physiques (valeurs numériques) par exemple 5m ou des positions symboliques comme une personne se trouve dans la cuisine, au salon,…

Il est possible aussi de combiner des positions physiques avec des positions symboliques.

2.4.2. Coordonnées Absolues ou Relatives

Dans un système de coordonnées absolues, les positions sont définies dans le cadre d'une référence globale et commune à toutes les positions. Par exemple le système GPS utilise le système de coordonnées WGS84 qui associe à chaque position sur terre des coordonnées absolues en termes de longitude, latitude et altitude.

Les coordonnées relatives sont définies par rapport à une référence commune, mais cette référence n'est pas la même pour tous les nœuds ; elle n'est donc pas globale. Par exemple, en France, les positions des villes sont définies par rapport à Paris et aux Etats-Unis elles sont définies par rapport à Washington.

Pour passer des coordonnées relatives aux coordonnées absolues, un ensemble d'amers est nécessaires (au moins trois en 2D). Ces amers doivent connaître leurs coordonnées absolues dans un repère global. Un ensemble de transformations géométriques (rotation, translation et éventuellement homothétie) sont nécessaires pour obtenir les coordonnées absolues de tous les nœuds.

2.4.3. Calcul Centralisé ou Distribué

Cette caractéristique fait référence à l'endroit où les positions sont calculées. Est-ce que le calcul de la position se fait localement par un participant (nœud) en se basant sur des mesures effectuées localement ou au contraire les mesures sont envoyées vers une station centrale qui calcule les positions et les renvoie vers les nœuds concernés.

En outre les aspects de mise à l'échelle (extensibilité) et d'efficacité (coût de communication et de calcul), le respect de la vie privée (l'éthique) est très important, il n'est pas toujours souhaitable qu'un nœud révèle sa position à un serveur central.

2.4.4. Exactitude et Précision

Les deux propriétés les plus importantes d'un système de localisation sont l'exactitude et la précision de ses positions.

L'exactitude est définie comme la distance maximale entre la position estimée et la position réelle d'un objet (un nœud). Une grande exactitude indique un écart maximal réduit.

La précision est définie comme le pourcentage avec lequel l'exactitude est obtenue, moyennée sur un ensemble d'expériences pour déterminer la position.

Les valeurs de l'exactitude et de la précision n'ont un sens que si elles sont données ensemble formant ainsi la caractéristique exactitude/précision du système de localisation[3].

Par exemple, le Service Standard du GPS a une exactitude de 13m en horizontale (précision à 95%) et 22m en vertical (précision à 95%).

2.4.5. Echelle

Un système de localisation peut être utilisé sur différentes échelles. Par exemple pour un déploiement intérieur l'échelle peut être une pièce ou d'un immeuble. Pour le déploiement extérieur, l'échelle peut être un parking ou une couverture mondiale.

Deux métriques importantes sont :

1- La zone couverte par le système par unité d'infrastructure. Par exemple, le système couvre deux pièces.

2- Nombre d'objets localisables par unité d'infrastructure et par unité de temps. Par exemple, le nombre de badges localisés dans une pièce chaque seconde.

2.4.6. Limites

Certains systèmes ont des limites (inhérentes) de déploiement. Par exemple, ils ne fonctionnent qu'à l'extérieur (GPS) ou à l'intérieur (système Active Badge). D'autres systèmes ont des portées limitées de quelques mètres pour fonctionner correctement (système MotionStar).

2.4.7. Coût

Les coûts d'un système de localisations peuvent être exprimés en termes de :

1- Temps : installation de l'infrastructure, administration et maintenance.

2- Espace : la taille de chaque capteur de localisation ainsi que la taille de l'infrastructure.

3- Energie : consommation électrique pour chaque capteur et pour l'infrastructure.

4- Budget : coût de chaque capteur, frais d'installation et de maintenance.

En outre des propriétés précédentes, un système de localisation peut être utilisé pour des fins d'identification ou de classification d'objets (ou de personnes). Cette information est moins importante dans le cadre des RCSF ou, si elle est utilisée, elle n'est pas considérée habituellement comme partie du système de localisation.

2.5. Les Systèmes de Localisation

Les systèmes de localisation développés en utilisant les réseaux sans fil à courte portée sont parfois appelés systèmes de positionnement local (Local Positioning Systems : LPS) pour les différencier des systèmes de positionnement global (Global Positioning Systems : GPS). Un appareil GPS détermine sa position en calculant la distance à partir de trois satellites GPS ou plus en orbite autour de la Terre. Chaque satellite GPS transmet en permanence un message contenant la position du satellite et le moment exact de la transmission de ce message. Ce message se déplace à peu près à la vitesse de la lumière pour atteindre le récepteur GPS. Le récepteur GPS compare le moment exact de la réception de ce message avec le moment où le message a été émis par le satellite pour calculer la distance parcourue. Connaissant les distances et les positions de trois satellites au minimum, le récepteur peut calculer sa propre position. Les LPS, en revanche, n'utilise pas des informations fournies par des satellites GPS ou tout autre émetteur de longue portée. Un LPS utilise des signaux RF transmis par des nœuds locaux avec des emplacements connus où le nœud mobile lui-même peut calculer sa propre position par rapport à ces nœuds de positions connus [4].

2.6. Mesure de Distance dans les Systèmes de Localisation

2.6.1. Temps d'Arrivée (ToA) [13]

La technique ToA (Time of Arrival) exploite la relation entre la distance parcourue par un signal et le temps de parcours. En effet, la distance entre l'émetteur et le récepteur est la multiplication du temps pris par le signal avec la vitesse des ondes radio

$$\text{Distance} = \text{Vitesse} * \text{Temps} \qquad (EQ\ 2.1)$$

La vitesse de propagation du signal radio est $\cong 3x10^8$ m/s.

La technique ToA nécessite la synchronisation parfaite entre l'émetteur et le récepteur. Si le récepteur connaît l'heure d'émission du signal, il peut alors calculer la distance le séparant de l'émetteur en déterminant le temps pris par le signal pour arriver au niveau du récepteur.

Selon le type du signal utilisé, la méthode ToA nécessite, en général, des horloges à très grande résolution du temps pour obtenir des précisions acceptables.

Pour les ondes radio, la résolution du temps doit être très élevée. Cependant, pour les ondes sonores, les besoins en résolution du temps sont modestes, mais leur inconvénient est que leur vitesse de propagation dépende des conditions extérieures comme la température et l'humidité. Un étalonnage rigoureux est donc nécessaire.

2.6.2. Différence de Temps d'Arrivée (TDoA) [13]

La méthode TDoA (Time Difference of Arrival) a deux variantes :

1. La différence du temps pris par un signal envoyé par un nœud pour arriver au niveau de trois nœuds ou plus. Cette variante est bien connue dans les réseaux cellulaires. Elle nécessite une synchronisation parfaite des stations de base.

2. La différence de temps pris par deux signaux envoyés par un même nœud pour arriver au niveau d'un autre nœud. Chaque nœud doit être équipé de deux dispositifs émission/réception.

En général, le premier dispositif utilise les ondes radio (vitesse $\cong 3x10^8$ m/s) et le deuxième utilise les ondes sonores (vitesse $\cong$ 340 m/s à la température de l'air de 15°C) ou ultrasonores. Le premier nœud émet les deux signaux simultanément. Pour chaque signal reçu, le deuxième nœud note son temps d'arrivée et ainsi il peut calculer la différence. En général, le premier signal est utilisé pour déclencher un compteur et dès l'arrivée du deuxième signal, le nœud aura directement la différence de temps d'arrivée. En connaissant les vitesses de propagation des deux signaux et l'écart de temps entre les deux réceptions, le nœud récepteur peut facilement calculer sa distance par rapport à l'émetteur.

Pour que la technique soit précise, les deux nœuds doivent être en visibilité directe. De plus, l'environnement ne doit pas favoriser l'écho. La Figure2.1 illustre le principe du TDoA.

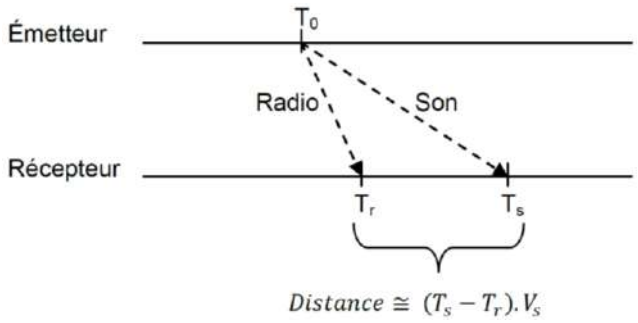


Figure 2.1 : Principe du TDoA

Tr est le temps d'arrivée du signal radio.

Ts est le temps d'arrivée du signal sonore (ou ultrasonore).

Vs est la vitesse du signal sonore (ou ultrasonore).

Cette technique est limitée par la distance à mesurer (inférieure à une centaine de mètres), car on suppose que le temps de propagation du signal radio est quasiment nul par rapport au temps de propagation du signal ultrasonore.

2.6.3. Indicateur de Puissance du Signal Reçu (RSSI)

La technique de localisation basée sur le RSSI utilise la puissance du signal reçu pour estimer la distance entre un nœud émetteur et un nœud récepteur. La distance est estimée en utilisant un modèle de propagation des ondes radio. Plusieurs modèles existent ; le plus simple [17] utilise la formule suivante :

$$P_{rcvd} = c\frac{P_{tx}}{d^{\propto}} \leftrightarrow d = \sqrt[\alpha]{\frac{cP_{tx}}{P_{rcvd}}} \qquad (EQ\ 2.2)$$

d : la distance entre les deux nœuds.

Ptx Prcvd: la puissance du signal transmis et reçu respectivement.

C , α : deux constantes connues du modèle.

α : Le coefficient d'atténuation du signal radio (α=2 par exemple).

C : Le rapport entre la puissance du signal reçu et la puissance du signal émis à une distance d'un mètre de l'émetteur.

On peut utiliser un autre model logarithmique qui utilise la formule suivante :

$$P_r(dBm) = P_t(dBm) - Pathloss$$

$$P_r(dBm) = P_t(dBm) - PL_0 - 10 * \alpha * \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \qquad (EQ\ 2.3)$$

Avec

$P_r(dBm)$ est la puissance reçus en dBm.

$P_t(dBm)$ est la puissance transmise en dBm.

PL_0 est le perte de trajet (path loss) pour une distance de référence.

α est le coefficient d'atténuation.

d est la distance entre l'émetteur et le récepteur.

d_0 est la distance de référence généralement égale à 1m.

D'autres modèles plus complexes existent. En général, chaque modèle est conçu pour un environnement et un scénario bien défini [4].

En pratique, les mesures RSSI sont bruitées (de l'ordre de plusieurs mètres). Ce bruit est dû à la propagation d'onde radio qui n'est pas uniforme en environnement réel. Par exemple, les ondes radio ne se propagent pas de la même façon dans toutes les directions, ni de la même façon sur l'herbe que sur l'asphalte ou sur d'autre matériaux. Les obstacles comme les murs, les meubles et autres reflètent et absorbent les ondes radio. Par conséquent, les mesures de distance avec RSSI n'ont pas démontré une bonne précision par rapport aux autres méthodes de localisation.

Le grand avantage de la méthode est son faible coût car tous les nœuds sont déjà équipés de dispositif de communication sans fil ; de plus elle ne rajoute aucun surcoût de communication. Son inconvénient est sa sensibilité aux bruits, interférences, asymétrie du lien de communication (RSSI non uniforme), obstacles et types d'antenne.

Cette méthode peut avoir des erreurs de mesure dépassant 50% de la portée du dispositif de communication [13]. Plusieurs travaux ont été menés pour améliorer la précision du RSSI en utilisant notamment le filtrage pour minimiser les fluctuations des valeurs du RSSI [18] [19].

2.6.4. L'Angle d'Arrivée (AoA)

A la place des distances, il est possible de localiser un nœud en utilisant des angles.

La méthode AoA (Angle of Arrival, DoA Direction of Arrival) permet de mesurer l'angle d'arrivée d'un signal. Pour cela le nœud qui mesure l'angle doit être équipé soit par un ensemble de petites d'antennes ou plusieurs récepteurs à ultrason. Lorsque un

nœud reçoit un signal, il utilise la phase ou le temps d'arrivée du signal au niveau de chaque antenne (ou récepteur ultrason) pour déduire l'angle d'arrivée du signal.

La nécessité d'avoir du matériel supplémentaire ainsi que des distances minimales entre les différents récepteurs (à ultrason) représentent les inconvénients de la méthode en termes de coût et d'encombrement (taille).

La précision de la méthode est de quelques degrés (environ 5°) [14].

2.7. Sources d'erreur dans la localisation basée sur RSSI

Les Sources d'erreur dans la localisation basée sur le RSSI peuvent être divisées en trois grandes catégories [4]: les erreurs liées au matériel, les limites de l'algorithme de localisation lui-même et l'effet de l'environnement. Cette partie examine brièvement les effets de certaines de ces sources d'erreur sur la précision de localisation.

Commençant par l'incertitude associée à la puissance du signal transmis. L'émetteur est prévu pour transmettre un signal d'une puissance prédéterminée. Cependant, les émetteurs-récepteurs construits à faible coût pour les réseaux sans fil à courte portée disposent normalement un mécanisme simple pour contrôler le niveau de puissance de sortie, et les fabricants de matériel ne garantissent qu'une gamme de puissance de sortie, lorsqu'un niveau spécifique est sélectionné. Par exemple, un fabricant peut indiquer que la puissance de sortie de 0 dBm est associée avec ±2 dB d'erreur. Cette quantité d'erreur varie d'une région à une autre et elle peut également dépendre de la température ambiante. Cette erreur spécifiée n'inclue pas l'incertitude due à l'antenne.

Les propriétés de l'antenne elle-même peut dégrader encore la précision de la puissance du signal transmis. Le diagramme de rayonnement d'une antenne n'est pas omnidirectionnel et la puissance du signal transmis au niveau des différentes directions peut varier considérablement. Le diagramme de rayonnement d'une antenne influe sur la précision des mesures d'intensité de signal dans le côté du récepteur aussi bien parce que l'atténuation dû à l'antenne, dépend de l'angle d'arrivée de signal reçu. Un algorithme de localisation simple ne peut pas expliquer les variations de diagramme de rayonnement d'une antenne. Si l'erreur RSSI est une valeur constante connue et n'est pas une fonction de l'environnement ou une fonction de la position d'un nœud, il est possible d'ajuster la valeur RSSI mesuré en conséquence par l'ajout d'un RSSI connu.

Le récepteur utilise normalement un mécanisme simple pour mesurer la puissance du signal reçu, et la différence entre la puissance du signal reçu réelle et la valeur reportée est une source d'erreur dans la localisation. L'intensité du signal reçu est

quantifiée pour former le RSSI, et cette quantification sera une source d'erreur inévitable pour tout procédé de localisation basé sur le RSSI.

L'algorithme de localisation lui-même peut contribuer à l'erreur de localisation. Par exemple, dans les applications de ressources limitées, l'utilisation des algorithmes complexes pour améliorer la précision ne pourrait pas être une option, ce qui va dégrader la précision de localisation.

L'effet de l'environnement est généralement la source d'erreur la plus difficile dans la localisation. Les trajets multiples peuvent considérablement affecter la puissance du signal reçu. La mobilité du nœud suivi provoque un changement dynamique dans le canal à évanouissement et le rend plus difficile à compenser l'effet d'évanouissement. L'étalement de spectre peut être utilisé pour réduire l'erreur induite par les trajets multiples dans certains environnements.

L'augmentation de la période de mesure de l'RSSI ou la répétition des mesures plusieurs fois peut réduire l'erreur dans certaines applications au prix de la réduction de la durée de vie du réseau. Mais, selon la source d'erreur, l'augmentation du nombre de mesures n'améliore pas toujours la précision. Par exemple, la plupart des erreurs liés au matériel varient d'un dispositif à un autre et peuvent dépendre ainsi de la température ambiante.

Il existe deux méthodes pour estimer les caractéristiques du canal: empirique ou théorique. Dans l'approche empirique, une enquête réelle du site est effectuée et l'intensité de signal est mesurée à plusieurs endroits et moments dans le temps. Ces points de données mesurées sont utilisés pour créer un modèle pour le canal qui inclut ainsi l'effet de l'évanouissement.

Dans l'approche théorique, les informations disponibles concernant l'environnement intérieur qui ne nécessite pas de mesures réelles sont utilisées pour modéliser les caractéristiques du canal prévu. Ray Tracing est une méthode populaire qui utilise le plan intérieur de l'environnement, les coefficients de réflexion des matériaux avoisinants, et d'autres informations qui sont disponibles sans aucune étude de site pour composer un modèle mathématique pour le canal. L'avantage de l'approche théorique est qu'il élimine la nécessité d'enquêtes sur le site. La méthode empirique, si elle est bien menée, elle peut avoir l'avantage d'améliorer la précision par rapport au modèle théorique.

2.8. Les Techniques de Localisation dans les RCSFs

Plusieurs techniques de localisation existent, on va parler brièvement sur trois seulement, les plus connues, la trilatération, la triangulation et le Fingerprinting.

2.8.1. Trilatération

Dans un environnement ouvert avec une forte probabilité de la ligne de visée (LOS) et les effets à faible propagation par trajets multiples, il pourrait être possible d'utiliser un algorithme de localisation simple, basée sur le RSSI, si la précision est acceptable. Figure 2.2a montre un scénario d'estimation idéal où il y a trois nœuds (nœuds 1, 2 et 3) avec des emplacements fixes connus. Le quatrième nœud est de position inconnue. Le but est de déterminer l'emplacement bidimensionnel estimé du nœud 4. Le même concept peut être étendu à un espace tridimensionnel (3D). L'estimation de l'emplacement dans la figure 2.2a commence par le nœud 4 qui émettre un signal avec une puissance de sortie prédéfini. En supposant que tous les nœuds Figure 2.2a ont des antennes omnidirectionnelles, chacun des nœuds fixes 1-3 peut estimer la distance (r) entre son emplacement et l'emplacement du nœud 4 en utilisant le model de propagation décrit dans l'équation (EQ 2.2). La position estimée sera l'intersection des 3 cercles centrées sur les 3 nœuds fixes, de rayons r1, r2 et r3 respectivement [4].

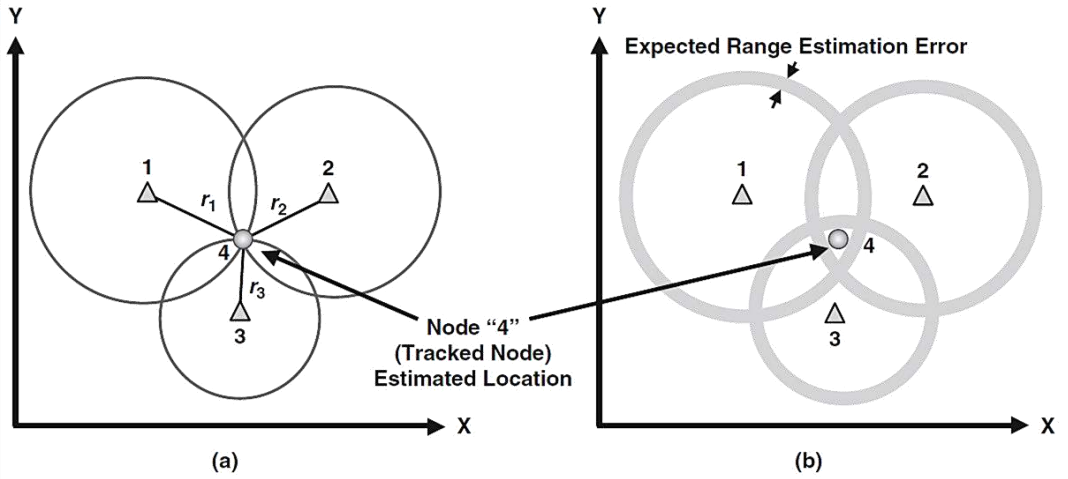


Figure 2.2 : le positionnement par trilatération (a) le cas idéal et (b) intervalle de l'erreur d'estimation

2.8.2. Triangulation [10]

La triangulation est une méthode trigonométrique qui permet de déterminer l'emplacement d'un nœud inconnu à partir de deux angles et une distance entre eux. Dans un réseau de capteurs, deux nœuds de référence doivent être situés sur une ligne de base horizontale qui est l'axe des x, et deux nœuds sur une ligne de base verticale qui est l'axe des y. La distance d_r entre deux nœuds de référence dans une ligne de base peut être mesurée dans l'étape préliminaire et stockée en mémoire. Les deux angles α_1 et α_2 sont mesurées entre une ligne de base et la ligne formée par le nœud de référence et le nœud cible, comme indiqué à la Figure 2.3.

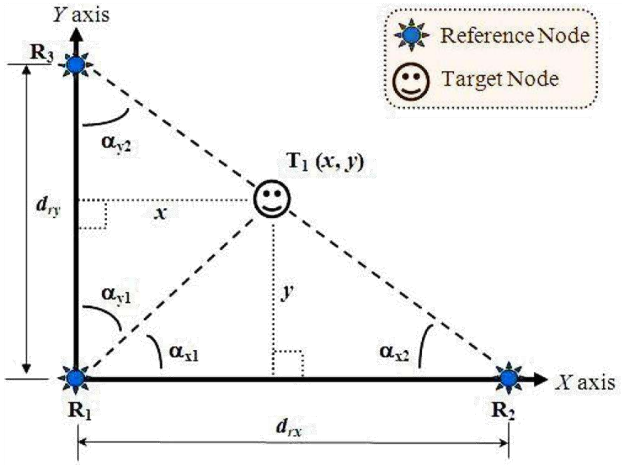


Figure 2.3 : Estimation de triangulation

Dans la Figure 2.3, les nœuds références R_1 et R_2 forment la ligne de base horizontale. Le nœud R_1 est réutilisé pour former la ligne de base verticale avec R_3. Un nœud cible T_1 se déplace librement autour de la région. En utilisant la triangulation, Les coordonnées (x, y) de T1 peut être déterminée en utilisant la combinaison R_1 et R_3 pour trouver x, et la combinaison R_1 et R_2 pour trouver y:

$$x = \frac{d_{ry}\sin(\alpha_{y1})\sin(\alpha_{y2})}{\sin(\alpha_{y1}+\alpha_{y2})}$$
$$y = \frac{d_{rx}\sin(\alpha_{x1})\sin(\alpha_{x2})}{\sin(\alpha_{x1}+\alpha_{x2})} \qquad (EQ\ 2.4)$$

2.8.3. Fingerprinting (Prise d'Empreintes Digitales)

L'idée de base des empreintes digitales est que la position du nœud mobile est en corrélation avec une ou plusieurs caractéristiques du signal. Souvent, le RSSI est utilisé, mais autre caractéristiques telles que le débit de réception, l'indicateur de la qualité de liaison et le rapport signal sur bruit sont également utilisés. En mesurant les caractéristiques de signal au niveau de positions connues et les stocker dans une base de données, la position d'un nœud cible peut être approximée par la mesure des mêmes caractéristiques de signal et les comparer avec la base de données. Les empreintes digitales ne dépend pas des propriétés de propagation des signaux théoriques mais exploite en fait le comportement irrégulier de la propagation du signal [9].

La localisation basée sur les empreintes digitales est réalisée en deux phases. La première phase nécessite une étude du site (la phase hors ligne ou la phase de formation) pour générer une base de données qui contient des valeurs de l'un des

caractéristiques du signal (RSSI, LQI etc..) provenant des nœuds références placés dans certains endroits. Dans la deuxième phase (la phase temps réel), chaque nœud cible est capable de déterminer sa propre position en comparant son caractéristique mesuré en temps réel, avec les informations disponible dans la base de données [4].

2.8.3.1. Configurations [9]

Il existe plusieurs configurations proposées pour les empreintes digitales. L'une des configurations les plus courantes est l'approche basée sur l'infrastructure. Plusieurs stations de base fixes transmettent ou reçoivent des paquets, et un ou plusieurs nœuds cibles reçoivent ou transmettent des paquets. Très souvent, un ordinateur central est utilisé pour stocker la base de données. Moins commun, c'est l'approche sans infrastructure, qui utilise uniquement les nœuds mobiles et distribue la base de données sur les nœuds.

Stockage de la base de données soit sur un ordinateur central, des stations de base, ou sur le nœud mobile lui-même a ses avantages et inconvénients en termes d'évolutivité, de la vie privée, les besoins en ressources, etc. Stockage de la base de données sur le nœud mobile est attrayant en raison de la prise en charge inhérente à vie privée. D'autre part, les nœuds mobiles sont souvent pauvres en ressources et ne peuvent donc stocker qu'une partie de la base de données.

Stockage de la base de données sur un ordinateur central, d'autre part, peut être un problème en termes de vie privée, depuis le nœud mobile doit communiquer avec le serveur pour déterminer ses positions.

2.8.3.2. Principe [4]

Le concept de base de cette méthode est illustré à la figure 2.4. Les nœuds fixes avec des emplacements connus sont numérotés de R1 à R9. Ces nœuds fixes (nœuds de référence) se chevauchent et forment une grille. Les distances physiques entre les nœuds ne sont pas nécessairement égales. Pendant la première phase, un récepteur (lecteur) est placé à chaque emplacement fixe prédéterminé L1 à L6, et le RSSI des signaux reçus à partir des nœuds fixes R1 à R9 est mesurée et stockée dans une matrice. En règle générale, le choix de la puissance du signal reçu est à l'échelle logarithmiques est représenté par la notation *PS*:

$$PS = \begin{matrix} PS_{L1\,R1} & PS_{L2\,R1} \ldots\ldots PS_{L6\,R1} \\ PS_{L1\,R2} & PS_{L2\,R2} \ldots\ldots PS_{L6\,R2} \\ \vdots & \\ PS_{L1\,R9} & PS_{L2\,R9} \ldots\ldots PS_{L6\,R9} \end{matrix} \qquad (EQ\ \ 2.5)$$

Où $PS_{L1\ Ri}$ est la puissance du signal reçu à partir du nœud de référence *i* à l'emplacement L1. La base de données contenant l'information de puissance de signal associée à tous les lecteurs L1 à L6 est appelée la carte radio. Dans la pratique, la puissance du signal aux lecteurs L1 à L6 est mesurée plusieurs fois, et le vecteur de la puissance du signal contient la moyenne statistique de la puissance des signaux reçus à partir des nœuds références 1-9. Le vecteur des valeurs de la puissance du signal pour chaque lecteur est appelé l'empreinte (ou signature RF) de cet emplacement.

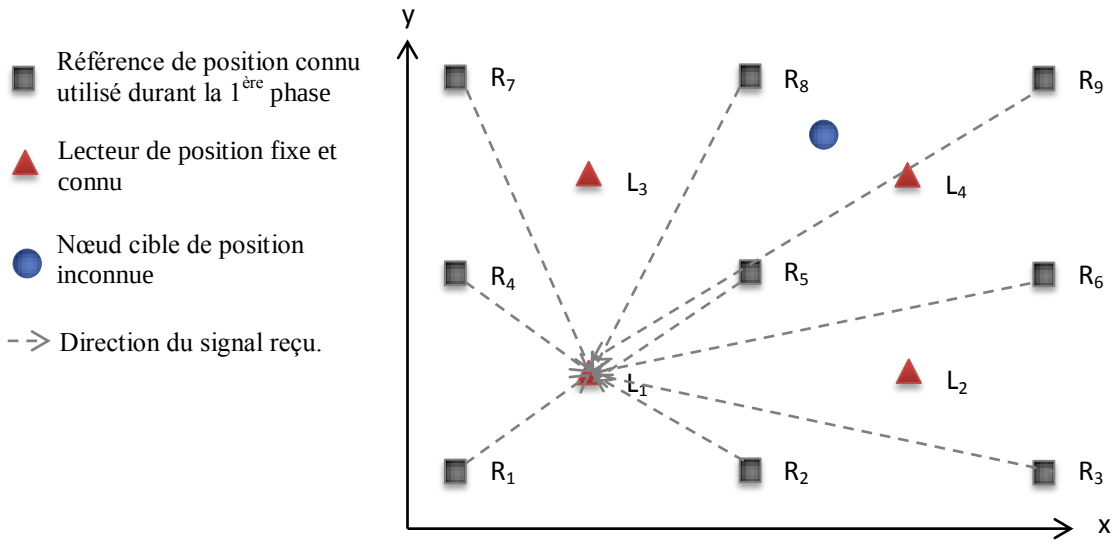


Figure 2.4 : La localisation basée sur le Fingerprinting

La puissance du signal à un endroit donné peut varier d'une manière significative selon l'orientation du l'antenne. De plus, dans une position donnée, l'antenne peut être en vue directe avec le récepteur, alors que, dans une autre orientation, le corps de la personne peut créer une obstruction. Une fois le système de localisation est implémenté, la précision de la localisation basée sur les empreintes digitales peut être améliorée au fil du temps en rassemblant des données mesurées des points supplémentaires et les ajouter à la base de données créée dans la phase de formation.

Après l'achèvement de la phase de formation, le nœud cible à la figure 2.4 peut déterminer sa propre position en passant en mode d'émission et émis des signaux vers chaque récepteur (lecteur) fixe. La puissance de chaque signal est calculée et stockée dans un vecteur associé à l'emplacement actuel du nœud cible:

$$PS_{inc} = [PS_{incL1}\ PS_{incL2}\ \ldots\ \mathrm{PS}_{\mathrm{inc}L6}] \qquad (EQ\ \ 2.6)$$

Où PS_{incLi} est la puissance du signal reçu à partir du nœud cible à l'emplacement L_i.

La distance euclidienne peut être utilisée pour déterminer la distance (Différence) entre le vecteur de puissances mesurées au cours de la phase temps réel et la matrice de puissances associées à chaque emplacement connu (les références). Par exemple, la distance euclidienne entre la $PS_{Li\,R1}$ et PS_{inc} est calculé à partir de l'équation suivante

$$d(PS_{inc}, PS_{Li\,R1}) = \sqrt{(PS_{incL1} - PS_{L1\,R1})^2 + (PS_{incL2} - PS_{L2\,R1})^2 + \cdots + (PS_{incL6} - PS_{L6\,R1})^2}$$

$$d(PS_{inc}, PS_{Li\,R1}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{6} (PS_{inc} - PS_{Li\,R1})^2} \qquad (EQ\ \ 2.7)$$

Où $d(PS_{inc}, PS_{Li\,R1})$ est la distance entre ces vecteurs.

D'autre part, on peut utiliser une autre distance appelée Manhatan pour calculer la différence, Par exemple, la distance Manhatan entre la $PS_{Li\,R1}$ et PS_{inc} est calculé à partir de l'équation suivante:

$$d(PS_{inc}, PS_{Li\,R1}) = |(PS_{incL1} - PS_{L1\,R1})| + |(PS_{incL2} - PS_{L2\,R1})| + \cdots + |(PS_{incL6} - PS_{L6\,R1})|$$

$$d(PS_{inc}, PS_{Li\,R1}) = \sum_{i=1}^{6} |(PS_{inc} - PS_{Li\,R1})| \qquad (EQ\ \ 2.8)$$

Si l'emplacement actuel du nœud cible est à la référence 1, alors, en théorie, les vecteurs PS_{inc} et $PS_{Li\,R1}$ sont identiques et leur distance est égale à zéro (d=0). Cependant, dans la pratique, l'environnement est dynamique et donc ces vecteurs ne seront pas identiques. En d'autres termes, à la référence 1, la distance entre PS_{inc} et $PS_{Li\,R1}$ est faible, mais pas nul. Cette distance n'est pas une distance physique, c'est seulement une indication de similarité entre les vecteurs de la puissance du signal PS_{inc} et $PS_{Li\,R1}$.

Une autre partie centrale dans un système de prise d'empreinte est la méthode d'estimation utilisée pour prédire la position du nœud cible à partir des caractéristiques de signal mesurées et les bases de données disponibles. Les méthodes d'estimation peuvent être globalement divisées en deux catégories: déterministe et probabiliste. Une méthode d'estimation déterministe utilise les entrées dans la base de données uniquement par leurs valeurs, alors qu'une approche probabiliste considère ces valeurs dans le cadre d'un processus aléatoire.

a- Rechercher les plus proches voisins (*ppv*): La recherche de voisins les plus proches est l'une des méthodes d'estimation déterministes les plus souvent utilisés. Dans un algorithme *ppv*, on calcule les distances dans l'espace de signal entre l'échantillon mesurée et les échantillons de la base de données. Les échantillons de la base de données qui correspond aux distances les plus courtes sont ensuite utilisés pour l'estimation de position. Pour mesurer la distance dans l'espace du signal, la distance euclidienne est souvent utilisée.

b- Cartes de probabilité (*CP*): est une méthode d'estimation probabiliste dans lequel un échantillon mesuré est représenté par une distribution normale. Pour chaque point d'ancrage, une carte radio est calculée en ajustant les échantillons de base de données à une grille uniforme recouvrant la zone de déploiement. Ensuite, pour chaque point d'ancrage d'une carte de probabilité est calculée en appliquant la fonction de densité de probabilité (pdf) sur le plan de la radio. En combinant ces cartes de probabilité en utilisant la multiplication, la position du nœud peut être approchée que les coordonnées avec la plus grande probabilité.

2.9. La Recherche des Plus Proches Voisins

a- 1-ppv [4] **:** La méthode la plus simple pour la détermination de l'emplacement du nœud cible dans la phase en temps réel est la technique du 1 plus proche voisin. Dans ce procédé l'algorithme de localisation calcule la distance euclidienne ou bien Manhatan entre le vecteur de la puissance du signal mesurée en temps réel (PS_{inc}) et la base de données des puissances du signal (PS) associées aux emplacements des références 1 à 9. L'emplacement estimé du nœud cible est simplement égale à l'un des emplacements des références connus 1 à 9, qui correspond à la plus petite distance du vecteur $d(PS_{inc}, PS)$. L'avantage de la méthode du 1 plus proche voisin est sa seul simplicité, mais elle ne profite pas des autres distances disponibles, associées avec le reste des références connus pour améliorer la précision de localisation.

b- k-ppv [4] : La méthode k-plus proche voisin (k-ppv), illustré à la figure 2.5, peut être utilisée au lieu de 1-ppv afin d'améliorer la précision de localisation. Dans cette méthode, l'algorithme de localisation identifie k références connus, qui correspond aux distances les plus petites, du vecteur $d(PS_{inc}, PS)$. La position estimée du nœud cible est égale à la moyenne de ces k emplacements connus:

$$\begin{cases} x_{estimé} = \frac{1}{k}X_1 + \frac{1}{k}X_2 + \cdots + \frac{1}{k}X_k = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} X_i \\ y_{estimé} = \frac{1}{k}Y_1 + \frac{1}{k}Y_2 + \cdots + \frac{1}{k}Y_k = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} Y_i \end{cases} \qquad (EQ\ \ 2.9)$$

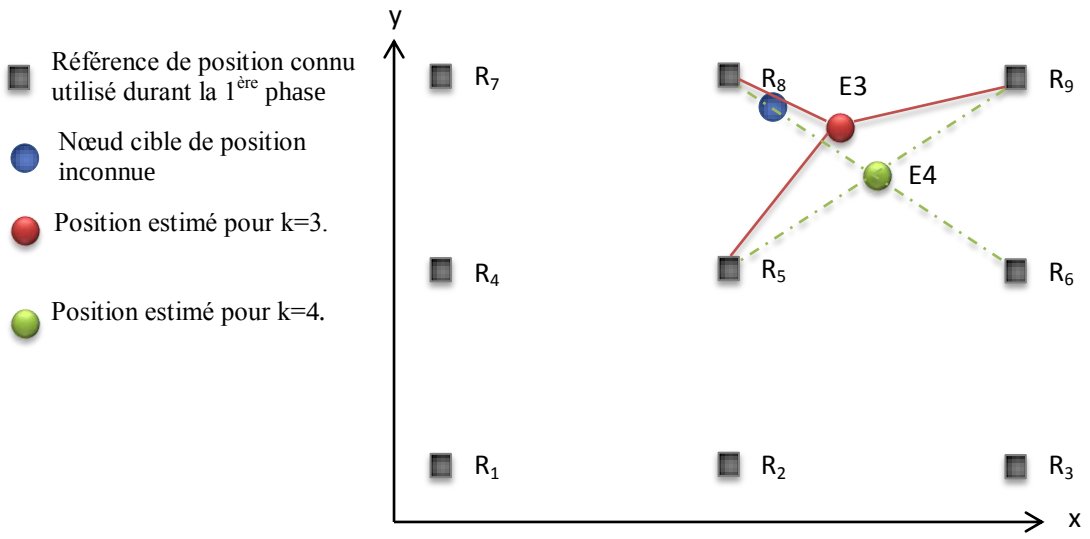


Figure 2.5 : l'effet de k dans la méthode k-ppv

Où ($x_{estimé}$, $y_{estimé}$) est la position estimée du nœud cible et (X_1, Y_1) à (X_k, Y_k) sont les coordonnées des k-plus proches voisins.

Par exemple, en supposant que l'emplacement du R8 à la figure 2.5 correspond à la plus petite distance dans le vecteur $d(PS_{inc}, PS)$, et que R5 et R9 ont les deux prochaines distances respectivement:

$$d(PS_{inc}, PS_{Li\ R8}) < d(PS_{inc}, PS_{Li\ R5}) < d(PS_{inc}, PS_{Li\ R9}) \qquad (EQ\ \ 2.10)$$

Dans la méthode du 1 plus proche voisin, R8 sera la position estimée du nœud cible. Dans k-plus proches voisins avec k=3, la position estimée du nœud cible est celle E3 à la figure 2.5, qui est la plus proche à l'emplacement réel du nœud cible par rapport à l'emplacement fournie par la méthode du 1 plus proche voisin.

L'augmentation de la valeur de k n'améliorera pas nécessairement la précision de localisation. Par exemple, à la figure 2.5 l'emplacement estimé lorsque k est égal à 3 a donné une meilleure résultat d'estimation que k=4. La raison est que, en augmentant la valeur de k, les nœuds les plus loin sont pris en compte et peuvent augmenter l'erreur d'estimation.

c- k-ppv pondérés : La méthode k plus proche voisin pondéré peut encore améliorer la précision de localisation de la technique k-ppv. Dans l'approche de k-ppv, tous les k voisins sélectionnés sont traités de manière égale dans la détermination de la position estimée. En Ignorant les différences entre ces voisins peut être une source d'erreur car le nœud cible peut se rapprocher de certains voisins que d'autres et cette information sera perdue dans la moyenne simple de l'emplacement de tous les k plus

proches voisins pour estimer l'emplacement du nœud cible. Dans le procédé k plus proche voisin pondérés, les distances associées à chaque k plus proche voisin sont prises en compte dans l'estimation de l'emplacement du nœud cible [4]. L'estimation de la position du nœud cible se fait par le calcul d'un coefficient (W) qui privilège les étiquettes de référence les plus proche Ri (Xi, Xi) pour employer leurs coordonnées dans le calcul :

$$W_i = \frac{\frac{1}{d_i^p}}{\sum_{r=1}^{k} \frac{1}{d_i^p}} \qquad (EQ\ \ 2.11)$$

Avec $p \in \mathbb{R}^+$.

Enfin la position de l'étiquette inconnue est donnée par l'équation

$$\begin{cases} x_{estimé} = W_1 * X_1 + W_2 * X_2 + \cdots + W_k * X_k \\ y_{estimé} = W_1 * Y_1 + W_2 * Y_2 + \cdots + W_k * Y_k \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{estimé} = \sum_{i=1}^{k} W_i * X_i \\ y_{estimé} = \sum_{i=1}^{k} W_i * Y_i \end{cases} \qquad (EQ\ \ 2.12)$$

Dans certains cas, il est possible que la distance entre deux vecteurs devienne nulle. Pour éviter une division par zéro dans l'équation de W, l'algorithme de localisation, dans ce cas estime la position du nœud cible comme la position du référence pour lequel la distance est nulle [4].

Pour évaluer la précision de ces méthodes, il faut calculer l'erreur quadratique moyenne définie comme suit :

$$EQM = \sqrt{(x_{estimé} - x_{réel})^2 + (y_{estimé} - y_{réel})^2} \qquad (EQ\ \ 2.13)$$

Où: ($x_{réel}$, $y_{réel}$) sont les coordonnées réelles du nœud cible et ($x_{estimé}$, $y_{estimé}$) sont les coordonnées estimées.

2.9.1. Algorithme de *k*-ppv

La figure 2.6 représente l'organigramme qui résume les étapes la méthode de localisation du fingerprinting.

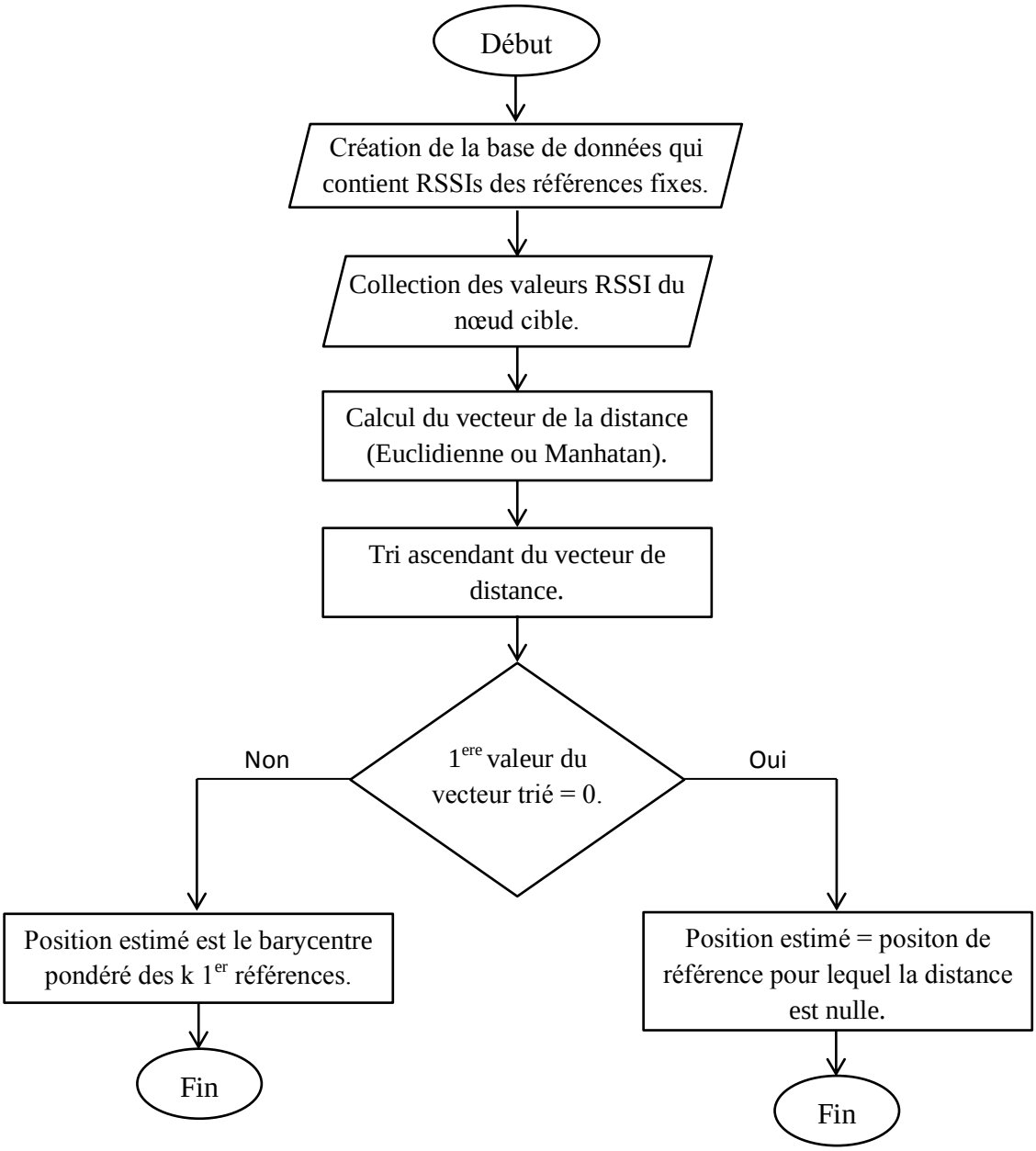


Figure 2.6 : L'organigramme de fingerprinting.

Chapitre 3

Etude Expérimentale

SOMMAIRE

3.1. INTRODUCTION ---- 41
3.2. SIMULATION ---- 41
3.2.1. Phase 1 : Base de Données ---- 41
3.2.2. Phase 2 : Localisation ---- 43
3.2.3. Discussion ---- 48
3.2.4. Conclusion 1 ---- 49
3.3. ETUDE EXPERIMENTALE ---- 49
3.3.1. Présentation du Matériel ---- 50
3.3.2. Configuration du Matériel ---- 52
.3.3.3 1er Essai ---- 52
3.3.4. Conclusion 2 ---- 58
3.3.5. 2ème Essai ---- 58
3.3.6. Conclusion 3 ---- 61

3.1. Introduction

La localisation d'un nœud de capteur dans un environnement fermé à l'aide des ondes radio est très difficile vu les changements observables dans les puissances reçus par le nœud capteur pour des distances égales, donc il est souvent conseillé de trouver les puissances qui représentent l'empreinte de cet environnement (fingerprinting), ces informations seront stocké dans une base de données pour les utiliser ultérieurement dans la localisation.

Notre travail consiste à simuler l'algorithme « fingerprinting » utilisé pour la localisation dans les environnements fermés, on utilisant une base de données expérimentale, et faire comparer les résultats pour des différents milieux, pour voir l'influence des paramètres de l'algorithme et l'environnement sur la localisation des nœuds.

3.2. Simulation

Dans cette partie on va simuler un système de localisation dans un milieu fermé par Matlab (version R2010a) en utilisant la méthode « fingerprinting ».

La première étape consiste à créer une base de données avec des valeurs RSSI pour chaque référence dans la zone de localisation. Dans la deuxième étape, on utilisera les techniques de recherche des plus proches voisins pour estimer les positions des nœuds cibles, et on termine par une discussion sur les résultats trouvés.

3.2.1. Phase 1 : Base de Données

La première phase dans l'algorithme de localisation est la création de la base de données pour une zone de localisation bien définie.

Supposons que " L " est le nombre de lecteurs placés dans des positions fixes et connus, et " R " le nombre de références placées dans des positions connus.

Les vecteurs qui contiennent les coordonnées des positions des lecteurs et les références sont respectivement (xl, yl) et (xr, yr) avec :

$$xl = [xl_1 \ xl_2 \ ... \ xl_L] \quad \text{et} \quad yl = [xl_1 \ yl_2 \ ... \ yl_L] ;$$

$$xr = [xr_1 \ xr_2 \ ... \ xr_R] \quad \text{et} \quad yr = [xr_1 \ yr_2 \ ... \ yr_R].$$

Dans cette simulation, on va étudier un exemple pour une zone de localisation illustrée sur la figure 3.1, (voir la **partie 1** de l'**Annexe A)**.

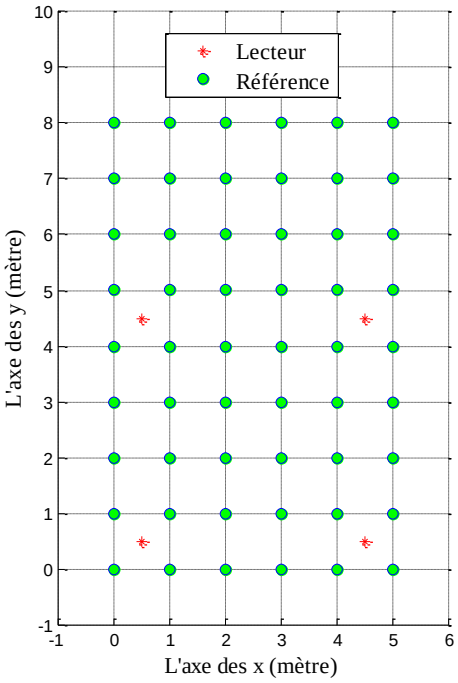


Figure 3.1 zone de localisation (simulation)

Pour trouver les valeurs RSSI reçus par les lecteurs à partir de chaque référence, il faut calculer tout d'abord la distance entre chaque lecteur et chaque référence, après on va remplacer la distance (*d*) dans l'équation (*EQ 2.3*), par la distance calculée. Le RSSI trouvé dans ce cas est un RSSI idéal dans le cas d'espace libre qui est un milieu parfait où l'effet de bruit et de multi trajets n'existe pas, ce qui est totalement différent de la situation étudiée dans ce travail, pour remédier à ce problème il faut définir un nouveau paramètre (*N*) qui remplace le bruit et les multi trajets dans la simulation. L'équation (*EQ 2.3*) devient :

$$P_r(dBm) = P_t(dBm) - PL_0 - 10 * \alpha * \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + N \qquad (EQ\ 3.2)$$

Pour calculer les distances entre les références et les lecteurs dans le plan (x,y) on utilise la distance Euclidienne définit par la formule :

$$d = \sqrt{(x_r - x_l)^2 + (y_r - y_l)^2} \qquad (EQ\ 3.3)$$

On obtient donc, *L* distances différentes pour chaque référence. (Voir **Partie 2** de l'**Annexe A**).

Finalement, pour trouver le RSSI il faut calculer le bruit et les pertes de trajet (*EQ3.2*) (voir **partie 2** de l'**Annexe A**). On suppose que :

- La puissance transmise $\mathrm{pt} = 0$ dBm;
- Le coefficient d'atténuation $\alpha = 2$;
- La distance de référence $\mathrm{d}_0 = 1$ mètre ;
- Le perte de trajet à une distance de référence d_0 , $PL_0 = 41.5$.

3.2.2. Phase 2 : Localisation

La deuxième phase dans l'algorithme de localisation, c'est l'estimation de position d'un nœud cible placé dans un emplacement quelconque.

La première étape consiste à calculer les distance entre le nœud cible et les lecteurs, cette distance sera remplacé par sa valeur dans l'équation (*EQ 3.2*), on obtient donc un vecteur qui contient *L* valeurs de RSSI correspond chacune à un lecteur.

La deuxième étape consiste à comparer le vecteur RSSI du nœud cible avec les informations de RSSI disponible dans la base de données, à l'aide de la distance Euclidienne ou la distance Manhattan en utilisant les formules suivantes :

$$d_{Euc}(i) = \sqrt{\left(RSSI_{cible}(1) - RSSI_{réf}\,(i,1)\right)^2 + \left(RSSI_{cible}\,(2) - RSSI_{réf}\,(i,2)\right)^2 + \cdots + \left(RSSI_{cible}\,(L) - RSSI_{réf}\,(i,L)\right)^2}$$

$$d_{Euc}(i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{L}\left(RSSI_{cible}\,(j) - RSSI_{réf}\,(i,j)\right)^2} \qquad (EQ\ \ 3.4)$$

$$d_{Manh}(i) = \left|\left(RSSI_{cible}\,(1) - RSSI_{réf}\,(i,1)\right)\right| + \left|\left(RSSI_{cible}\,(2) - RSSI_{réf}\,(i,2)\right)\right| + \cdots + \left|\left(RSSI_{cible}\,(L) - RSSI_{réf}(i,L)\right)\right|$$

$$d_{Manh}(i) = \sum_{j=1}^{L}\left|\left(RSSI_{cible}\,(j) - RSSI_{réf}\,(i,j)\right)\right| \qquad (EQ\ \ 3.5)$$

Avec :

- $d_{Euc}(i)$: c'est la distance Euclidienne entre le RSSI de référence *i* et le RSSI du nœud cible.
- $d_{Manh}(i)$: c'est la distance Manhattan entre le RSSI de référence *i* et le RSSI du nœud cible.

- $RSSI_{cible}\ (j)$: le RSSI reçus par le lecteur *j* à partir du nœud cible.
- $RSSI_{réf}\ (i,j)$: le RSSI reçus par le lecteur *j* à partir du nœud référence *i*.

Pour localiser le nœud cible, nous allons premièrement trier le vecteur d_{Euc} ou d_{Manh}en ordre ascendant, il y a deux possibilités comme indiqué dans le chapitre 2 pour estimer la position de la cible :

- Si la 1ère valeur du vecteur trié est nulle, la position estimée sera la position de référence pour lequel la distance est nulle.
- Si non, on peut utiliser trois techniques, 1-ppv, k-ppv ou k-ppv pondérés.

Pour évaluer la précision de ces méthodes, nous avons calculé l'erreur quadratique moyenne définie précédemment dans l'équation (*EQ 2.13*). **(**Voir **la partie 3** de l'**Annexe A)**.

Pour tester l'efficacité de ce programme de positionnement, on va prendre aléatoirement 5 positions différentes des nœuds cibles dans la zone de localisation illustrée précédemment sur la figure 3.1.

Pour ce test on a décidé de travailler avec les deux distances « Euclidienne et Manhattan », de fixer *k* à 4 et l'exposant de la distance *p* à 2 dans la formule du coefficient de poids (EQ 2.11).

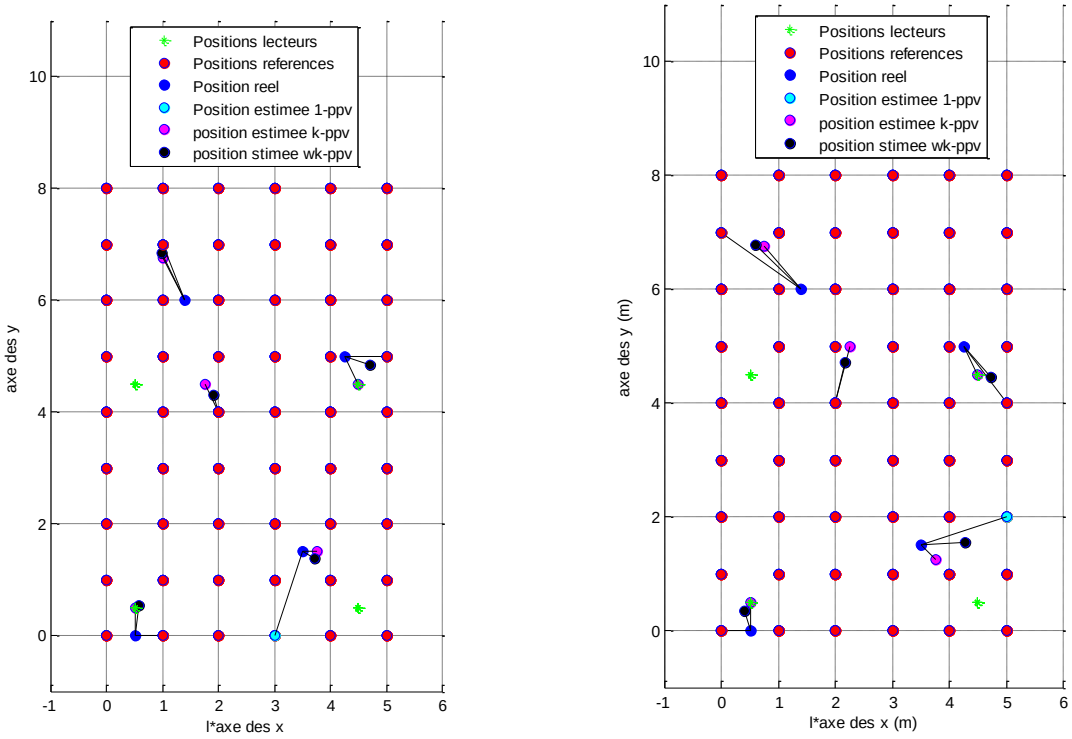
Les résultats trouvés sont présentés dans les tableaux 3.1, 3.2 et la figure 3.2:

($x_{réel}$ $y_{réel}$)	($x_{éstimé}$ $y_{éstimé}$) 1-ppv	($x_{éstimé}$ $y_{éstimé}$) k-ppv	($x_{éstimé}$ $y_{éstimé}$) k-ppv pondérés	EQM (1-ppv) (m)	EQM (k-ppv) (m)	EQM (k-ppv pondérés) (m)
(2 4)	(2 4)	(1.75 4.5)	(1.91 4.3)	0	0.56	0.31
(0.5 0)	(1 0)	(0.5 0.5)	(0.57 0.53)	0.5	0.5	0.54
(4.25 5)	(5 5)	(4.5 4.5)	(4.71 4.84)	0.75	0.56	0.49
(1.4 6)	(1 7)	(1 6.75)	(0.97 6.83)	1.07	0.85	0.93
(3.5 1.5)	(3 0)	(3.75 1.5)	(3.7 1.38)	1.58	0.25	0.24
La moyenne des erreurs de l'estimation				**0.78**	**0.544**	**0.502**

Tableau 3.1 Les résultats du test en utilisant la distance Euclidienne

($x_{réel}$ $y_{réel}$)	($x_{éstimé}$ $y_{éstimé}$) 1-ppv	($x_{éstimé}$ $y_{éstimé}$) k-ppv	($x_{éstimé}$ $y_{éstimé}$) k-ppv pondérés	EQM (1-ppv) (m)	EQM (k-ppv) (m)	EQM (k-ppv pondérés) (m)
(2 4)	(2 4)	(2.25 5)	(2.16 4.71)	0	1.03	0.73
(0.5 0)	(0 0)	(0.5 0.5)	(0.41 0.35)	0.5	0.5	0.36
(4.25 5)	(5 4)	(4.5 4.5)	(4.73 4.44)	1.25	0.56	0.73
(1.4 6)	(0 7)	(0.75 6.75)	(0.6 6.76)	1.72	0.99	1.1
(3.5 1.5)	(5 2)	(3.75 1.25)	(4.26 1.55)	1.58	0.35	0.77
La moyenne des erreurs de l'estimation				**1.01**	**0.686**	**0.738**

Tableau 3.2 Les résultats du test en utilisant la distance Manhattan



a. Euclidienne b. Manhattan

Figure 3.2 résultats du test en utilisant la distance Euclidienne et Manhattan

A partir des résultats obtenus, nous constatons que le programme donne de bons résultats, avec des erreurs de positionnement dues au bruit et au multi trajet comme il a était déjà mentionné précédemment. Les erreurs de l'estimation de position ont été dans des limites raisonnables, où l'erreur max en utilisant la distance Euclidienne n'a pas dépassé 1.58 m, et l'erreur max en utilisant la distance Manhattan n'a pas dépassé 1.72 m. L'erreur moyenne en utilisant la distance Euclidienne était minimum pour le k-ppv pondérés suivie par le k-ppv et le 1-ppv respectivement. L'erreur moyenne en utilisant la distance Manhattan était minimum pour le k-ppv suivie par le k-ppv pondérés et le 1-ppv respectivement.

A partir des résultats obtenue dans les tableaux ci-dessus On remarque que les erreurs trouvées sont différents d'une technique de localisation à une autre, Ces différences sont dues aux plusieurs paramètres dans le programme de localisation :

- ✓ Le choix de la distance (Euclidienne ou Manhattan).
- ✓ Le choix de k.
- ✓ Le choix de w.

Pour confirmer cette remarque, on doit faire une étude qui permet de voir l'effet de ces paramètres citées au-dessus sur le résultat de la localisation.

Dans cette étude, on doit placer 546 nœuds cible répartis dans toute la zone, et après on va localiser chaque nœud et calculer son erreur de l'estimation, la moyenne de tous les erreurs est calculée et enregistrée dans un tableau (**Annexes B** et **C**) cette opération est répétée à la fois avec la distance Euclidienne et la distance Manhattan, pour différents valeurs de p et k, (p={0, 1, 2, 3, 4, 5},k={1, 2, 3, …, 54}). Les résultats obtenus en utilisant le programme de l'**Annexe** A sont représentés dans les figures 3.3 et 3.4.

Pour voir aussi l'effet de la distance inter-référence sur l'erreur de la localisation, on a répété la même étude précédente dans la même zone, avec un changement de la distance inter-référence de 1 m à 0.5 m. la moyenne de tous les erreurs est calculée et enregistrée dans un tableau (**Annexes D** et **E**) pour différents valeurs de p et k, (p={0,1,2,3,4,5},k={1,2,3,…,187}).

Les résultats de la deuxième étude sont représentés sur les figures 3.5 et 3.6, pour mieux faire la comparaison entre les deux études on a limité k à 54.

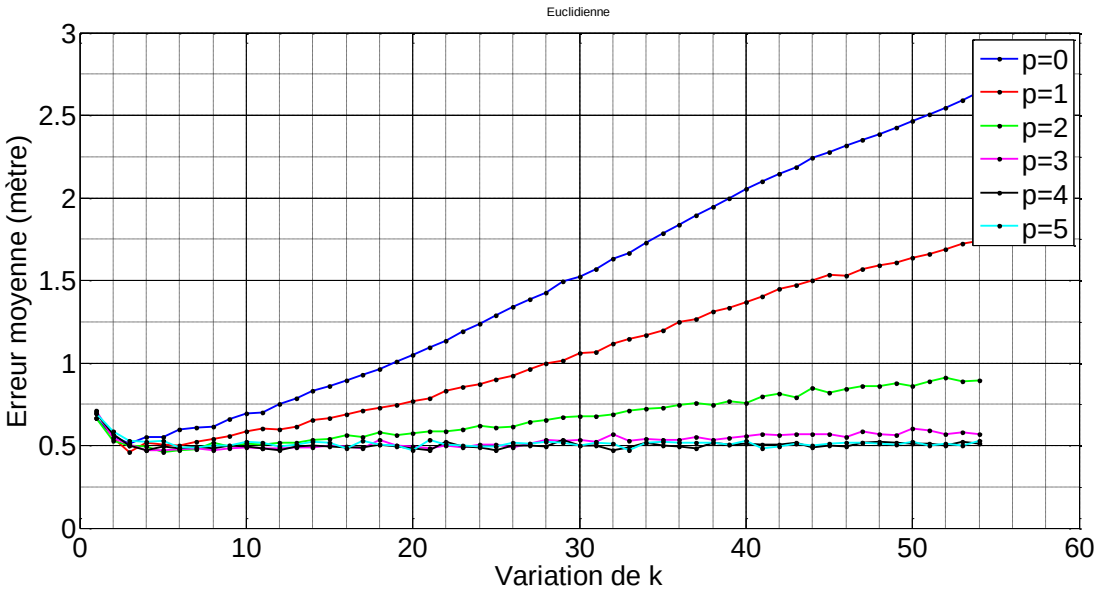


Figure 3.3 Erreur moyenne (mètre) de 546 points en utilisant la distance Euclidienne pour différents valeurs de k et p pour une distance d'interférence de 1m.

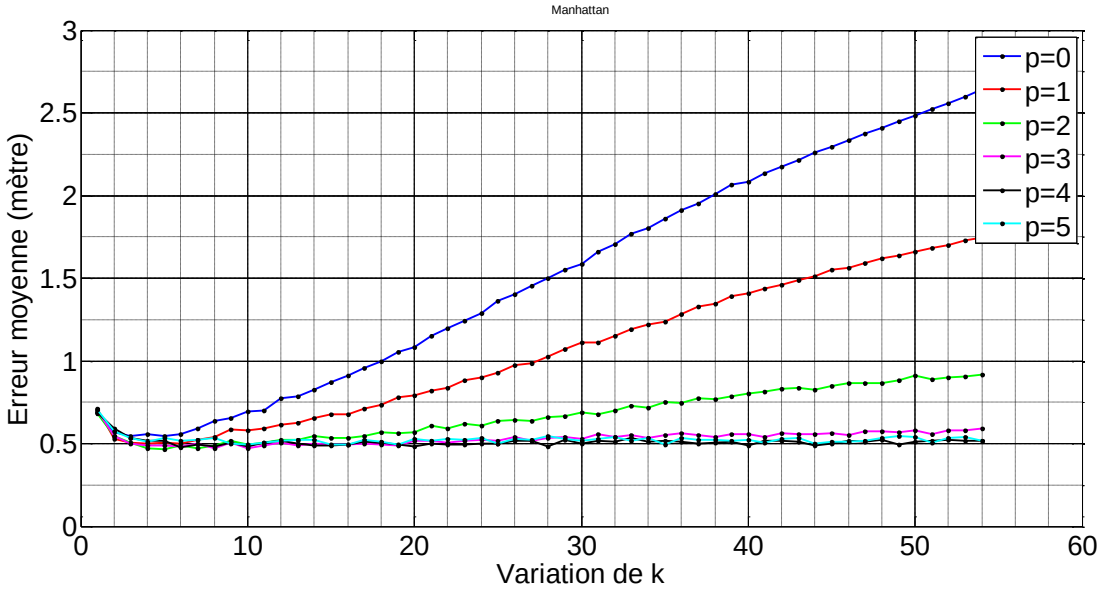


Figure 3.4 Erreur moyenne (mètre) de 546 points en utilisant la distance Manhattan pour différents valeurs de k et p pour une distance d'interférence de 1m.

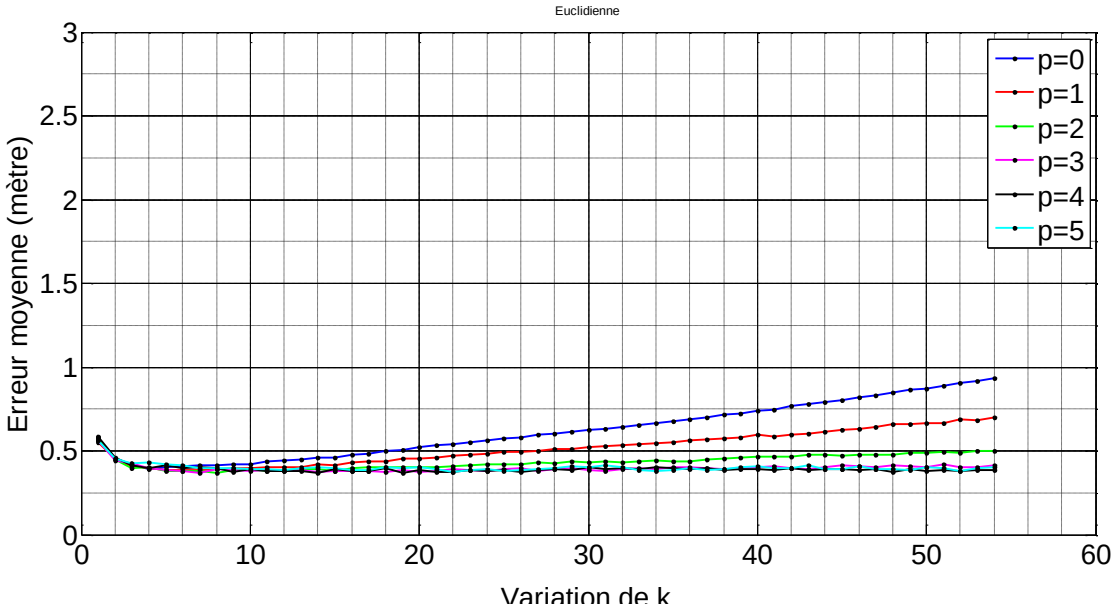


Figure 3.5 Erreur moyenne (mètre) de 546 points en utilisant la distance Euclidienne pour différents valeurs de k et p pour une distance d'interférence de 0.5m.

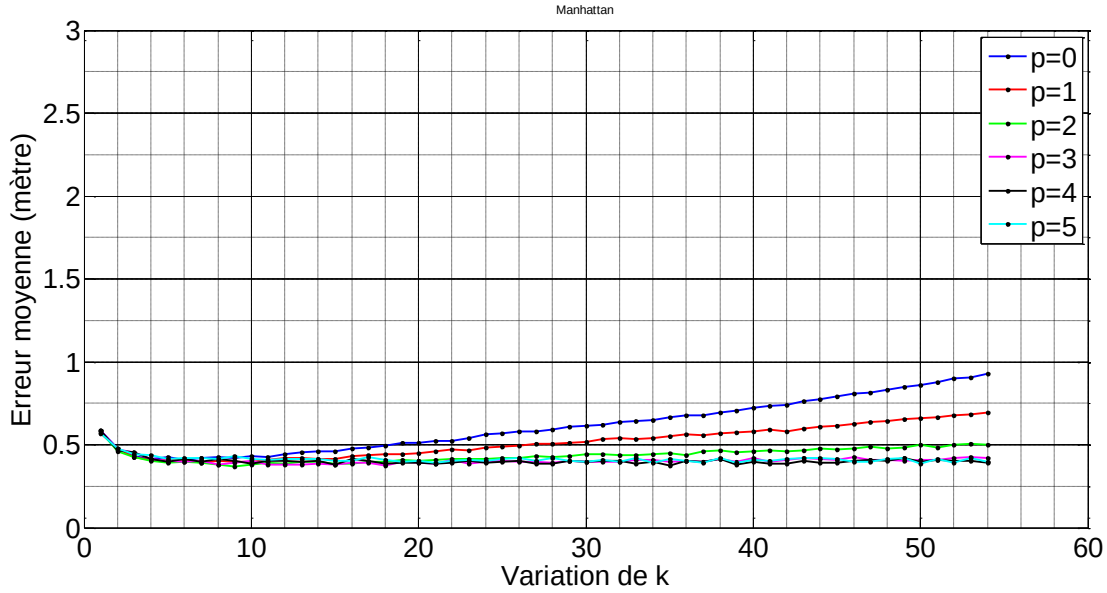


Figure 3.6 Erreur moyenne (mètre) de 546 points en utilisant la distance Manhattan pour différents valeurs de k et p pour une distance d'interférence de 0.5m.

3.2.3. Discussion

Pour les graphes de la méthode Euclidienne avec distance inter-référence égale à 1 m représentés sur la figure 3.3, on remarque qu'on peut diviser tous les graphes en deux intervalles, le premier pour des valeur de k comprises entre 1 et 3, le deuxième intervalle correspond à des valeurs de k supérieur ou égale à 3. En ce qui concerne le premier intervalle, l'erreur max est égale à 0.71 m (pour k=1, p=3) et l'erreur min est égale à 0.46 m (pour k=3, p=1). Pour le deuxième intervalle, on remarque que pour $p < 3$ les graphes sont ascendants avec une erreur moyenne max comprise entre 0.89 m et 2.64 m (pour k=54, p=0, 1, 2), pour $p \geq 3$ les erreurs sont presque stables pour n'importe quelle valeur de k, où l'erreur moyenne comprise entre 0.47 m (pour k=8, p=3) et 0.6 m (pour k=50, p=3), donc on peut dire que k n'a pas une grande influence sur l'erreur moyenne dans cette intervalle, avec une différence max entre les erreurs arrive à 0.13 m.

Pour les graphes de la méthode Manhattan avec distance inter-référence égale à 1 m représentés sur la figure 3.4, après la comparaison avec les graphes de la méthode Euclidienne on remarque que les résultats sont presque les même avec une différence négligeable qui ne dépasse pas 0.1 m, avec une erreur moyenne max égale 2.64 m (pour k=54, p=0) et une erreur moyenne min égale à 0.47 m (pour k= 5, p=2).

Les résultats de la deuxième étude représentés dans les graphes 3.5 et 3.6 confirme encore qu'il n y a pas une grande différence entre les deux distance, Euclidienne et

Manhattan. En ce qui concerne la comparaison entre les deux études, les tableaux suivants contiennent les erreurs moyennes pour k= {1, 3, 54} de chaque étude pour différent valeurs de p.

	P=0	P=1	P=2	P=3	P=4	P=5
Erreur (m) (distance inter-référence 1 m)	0.66	0.71	0.67	0.71	0.70	0.69
Erreur (m) (distance inter-référence 0.5m)	0.58	0.55	0.58	0.56	0.57	0.56

Tableau 3.3 Erreurs moyennes pour k=1

	P=0	P=1	P=2	P=3	P=4	P=5
Erreur (m) (distance inter-référence 1 m)	0.51	0.46	0.50	0.50	0.50	0.53
Erreur (m) (distance inter-référence 0.5m)	0.42	0.41	0.40	0.43	0.42	0.43

Tableau 3.4 Erreurs moyennes pour k=3

	P=0	P=1	P=2	P=3	P=4	P=5
Erreur (m) (distance inter-référence 1 m)	2.64	1.74	0.89	0.57	0.51	0.53
Erreur (m) (distance inter-référence 0.5m)	0.93	0.70	0.50	0.41	0.38	0.40

Tableau 3.5 Erreurs moyennes pour k=54

3.2.4. Conclusion 1

D'après les résultats obtenue dans les tableaux ci-dessus, On remarque qu'il n'y a pas une grande différence entre les deux études, où les erreurs moyennes de la deuxième étude sont meilleur par rapport à la première, donc on peut conclure que lorsque la distance inter-référence est plus petit l'erreur moyenne est moins. Le seul inconvénient de la deuxième étude est la base de données qui est plus grand, ce qui influe négativement sur le temps de traitement.

3.3. Etude Expérimentale

La deuxième partie de notre étude consiste à tester le programme pour des valeurs de RRSI expérimentale, prélevé d'un environnement réel, en utilisant le kit de développement ZigBee CC2530 (CC2530ZDK) de Texas Instruments.

3.3.1. Présentation du Matériel

Le kit de développement ZigBee CC2530 (CC2530ZDK) (Figure 3.7) comprend le matériel et le logiciel qui permet de tester rapidement les performances RF CC2530 et offre une plateforme complète pour le développement des systèmes prototypes RF avancées et les applications ZigBee [20].



Figure 3.7 : Le kit de développement Zigbee CC2530

- Le kit peut être utilisé pour créer un petit réseau de capteurs en utilisant ZigBee et le CC2530.
- L'utilisation de SmartRF Studio pour réaliser des mesures RF. La radio peut être facilement configuré pour mesurer la sensibilité, la puissance de sortie et autres paramètres RF.

Le kit CC2530ZDK contient les composants suivants :

- 2 x SmartRF05EB (les deux grandes cartes) : c'est les cartes d'évaluation principales dans le kit avec un grand nombre d'interfaces utilisateur. Elle est la plate-forme pour les modules d'évaluation (EM) et peut être connecté à l'ordinateur via USB pour contrôler les EM.
- 5 x SmartRF05BB : C'est la carte d'alimentation, elle peut être utilisée comme alternative de la carte d'évaluation, fournissant un nœud autonome lorsque le CC2530EM est connecté. Elle est alimentée par 2 piles AA.

- 7 x CC2530EM : C'est le module d'évaluation, il contient le circuit intégré RF. Le module peut être branché sur le SmartRF05EB.
  - ✓ 2 de ces CC2530EM sont préprogrammés avec l'application SensorDemo collector.
  - ✓ 5 de ces CC2530EM sont préprogrammés avec l'application SensorDemo Sensor.
- 7 x Antennes.
- 1 x CC2531 clé USB
- Câbles.
- Batteries.

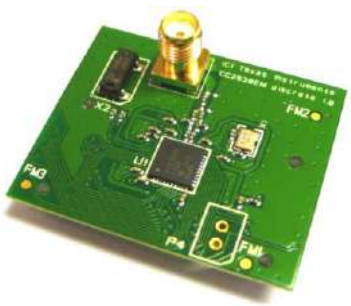


Figure 3.8 module d'évaluation



Figure 3.9 carte d'alimentation

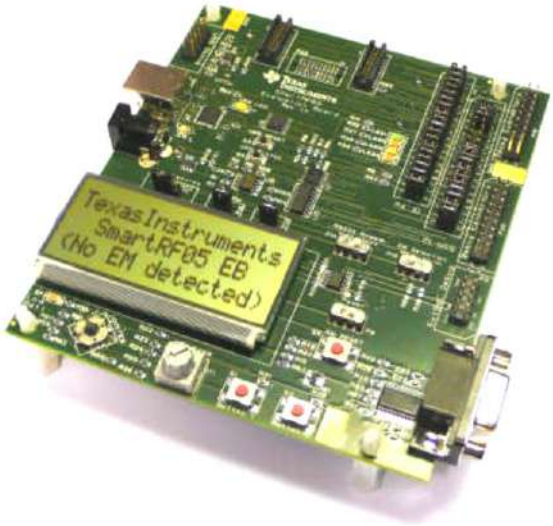


Figure 3.10 carte d'évaluation

3.3.2. Configuration du Matériel

Le capteur et la passerelle sont placés en ligne droite et en visibilité directe selon la configuration suivante :

- La puissance de transmission : 0 dBm.
- Le Canal choisi : 2405 Mhz.
- La valeur de RSSI utilisée est égale à la moyenne de 30 valeurs de RSSI des 30 paquets reçus.

3.3.3. 1er Essai

3.3.3.1. Environnement de l'Expérimentation

Le 1^{èr} essai a été déroulé dans le siège des scouts musulman algérien de Médéa, situé dans le quartier de « Messala », ce siège est constitué de 6 salles et une salle de bain comme illustré sur la figure 3.11. Pour faire ce 1er test, on a choisi de travailler dans la salle la plus grande qui est salle 5, illustrée dans la figure 3.12.

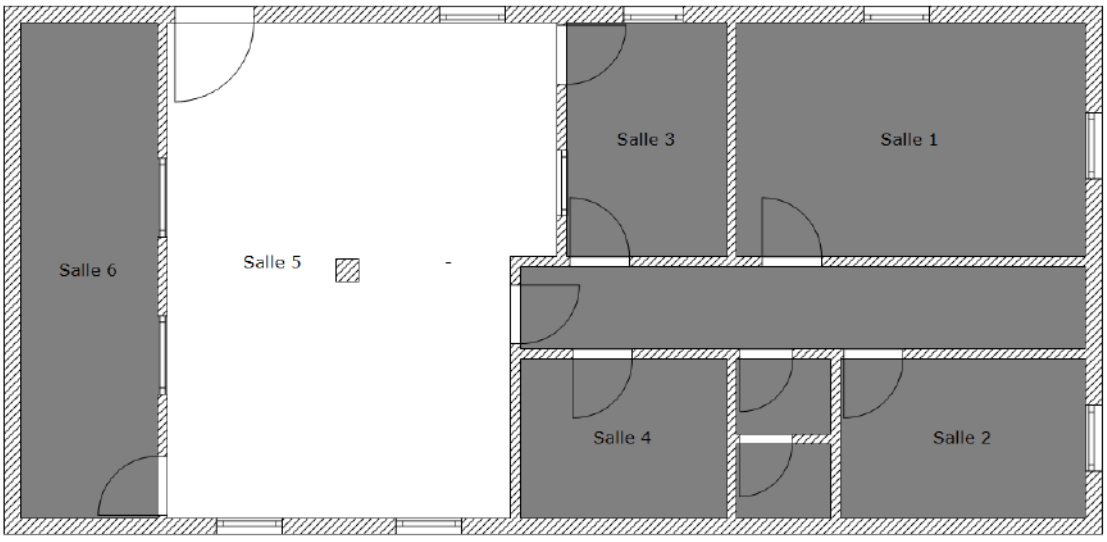


Figure 3.11 Le plan du siège de l'SMA de Médéa



Figure 3.12 l'environnement du 1er essai

3.3.3.2. Phase 1 : Base de Données

Avant de remplir la base de données, on a limité la zone de localisation dans la salle de l'expérience et on a fixé un repère XoY pour positionner les nœuds lecteur et les nœuds référence dans cette zone, on a décidé aussi de travailler avec 4 nœuds lecteur, L1, L2, L3 et L4, où leurs coordonnées sont (0.75, 0.75), (4.25, 0.75), (4.75, 6.15) et (0.75, 6.15) respectivement, et 52 nœuds référence, dans un premier temps et 171 dans un deuxième temps, distribuées d'une manière régulière pour couvrir toute la zone de localisation comme illustré dans la figure 3.13.

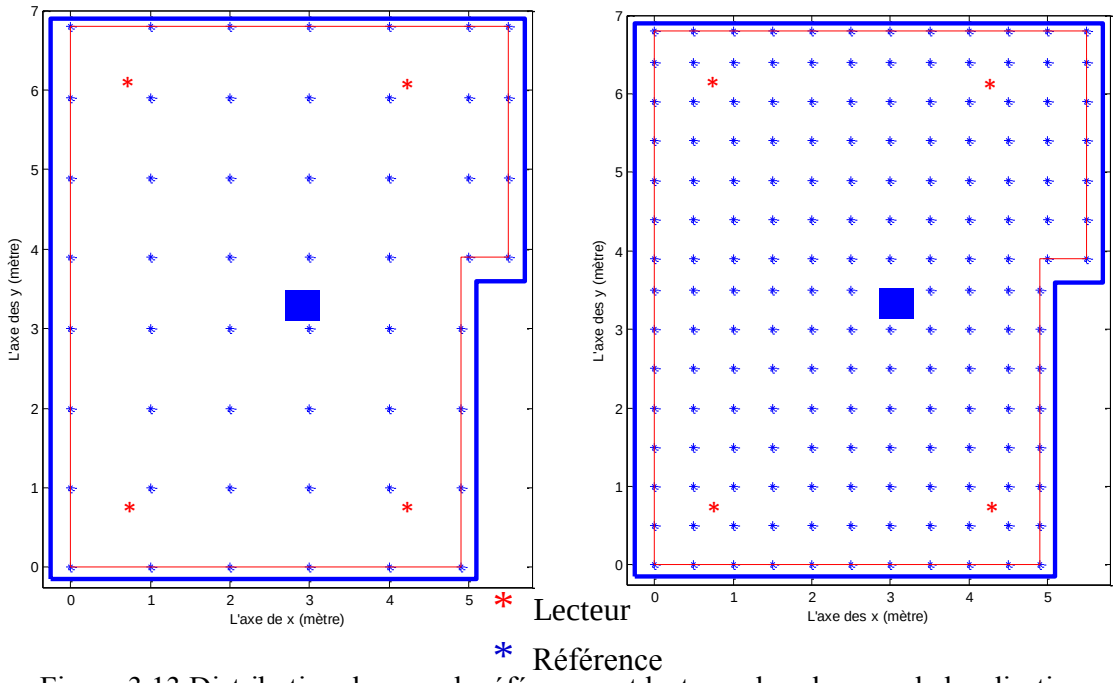


Figure 3.13 Distribution des nœuds références et lecteurs dans la zone de localisation

Pour remplir la base de données avec les informations RSSI de chaque nœud référence, le nœud référence transmis des paquets de données vers le lecteur, ce dernier est connecté au PC avec un câble série USB en mode passerelle (gateway) comme illustré sur la figure 3.14 , le PC doit être équipé du logiciel SmartRF Studio qui permet de récupérer les informations reçus par le lecteur et de calculer la valeur RSSI moyenne de plusieurs paquets.



Figure 3.14 un petit réseau de capteurs en utilisant le kit CC2530

On a configuré le SmartRF Studio pour calculer la valeur RSSI moyenne de 30 paquets envoyés par chacun des références, et reçus par un seul lecteur, la même opération est répétée pour les autres lecteurs.

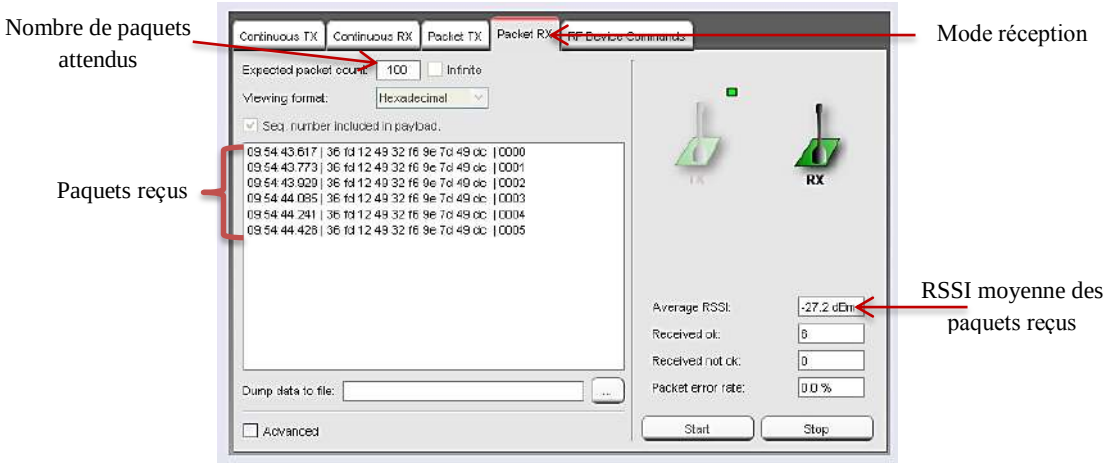


Figure 3.15 L'interface de SmartRF Studio 7

3.3.3.3. Phase 2 : Localisation

La deuxième phase dans ce 1er essai est la phase de la localisation, cette phase consiste à positionner un nœud cible aléatoirement dans la zone de localisation puis estimer son position en utilisant le programme de positionnement. La première étape dans cette phase est la collection des RSSI du nœud cible de la même manière utilisé dans la première phase, on obtient alors 4 valeurs RSSI pour chaque nœud cible, ces RSSI seront insérer par la suite dans le programme pour estimer son position, cette dernière sera comparer avec la position réelle pour calculer l'erreur de l'estimation.

Dans cet essai on a choisi aléatoirement 70 nœuds cible dispersés dans toute la zone de localisation, ces positions et leurs RSSI se trouvent dans l'**Annexe G.**

Comme il a été mentionné dans la simulation, la position estimée est influencée par les 3 paramètres du programme de localisation, la distance (Euclidienne ou Manhattan), k et p. donc la même étude que la simulation sera faite pour voir l'influence de chaque paramètre sur l'erreur de localisation.

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 3.16, 3.17, 3.18 et 3.19.

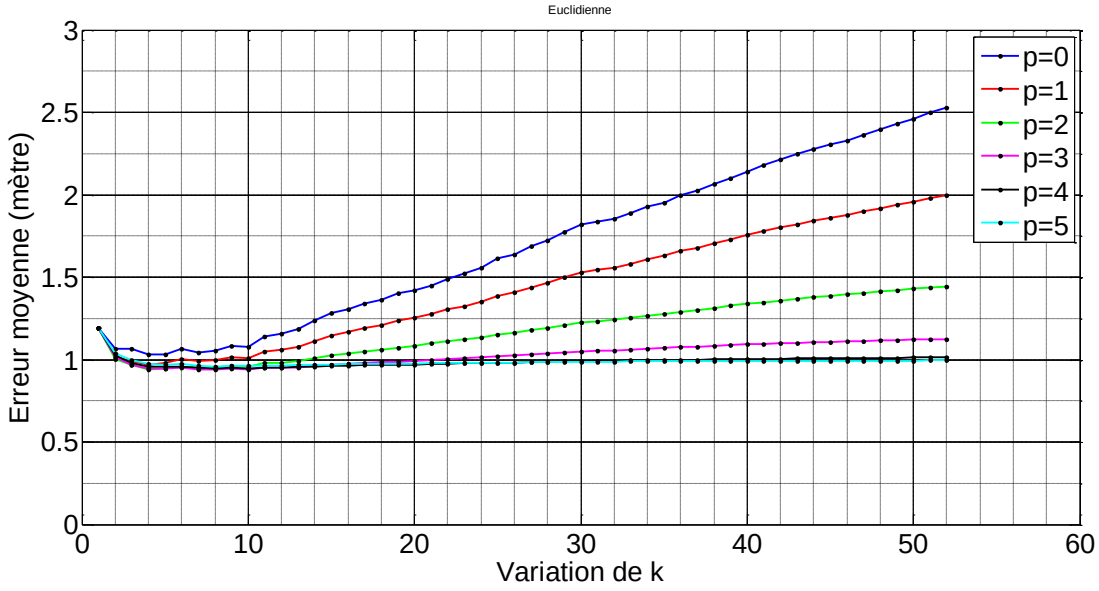


Figure 3.16 Erreur moyenne (mètre) de 70 points en utilisant la distance Euclidienne pour différents valeurs de k et p (1er essai, 1 m avec 52 références).

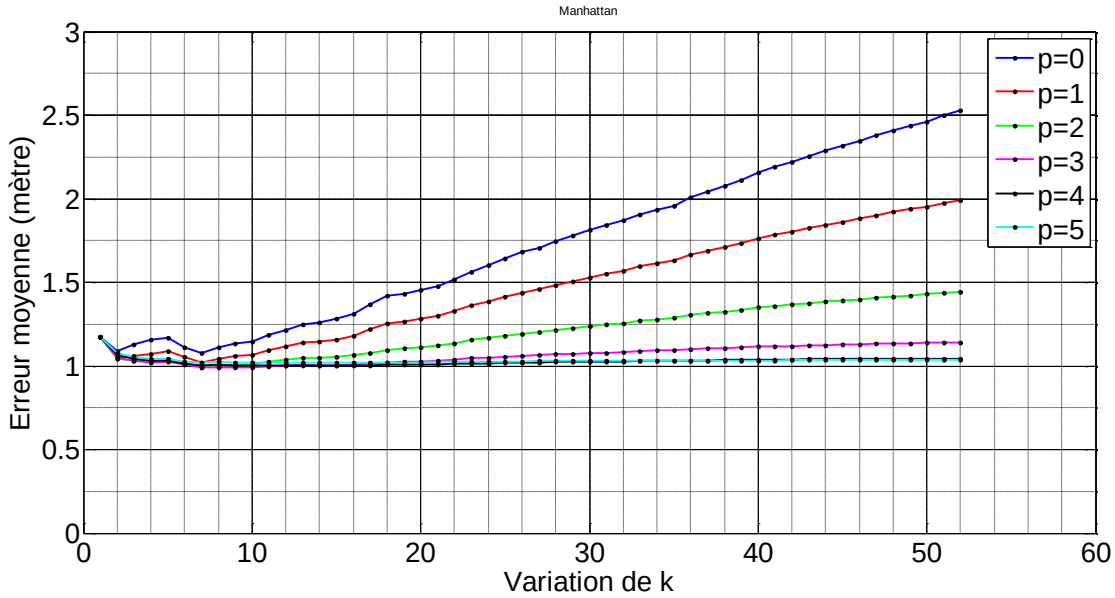


Figure 3.17 Erreur moyenne (mètre) de 70 points en utilisant la distance Manhattan pour différents valeurs de k et p (1er essai, 1 m avec 52 références).

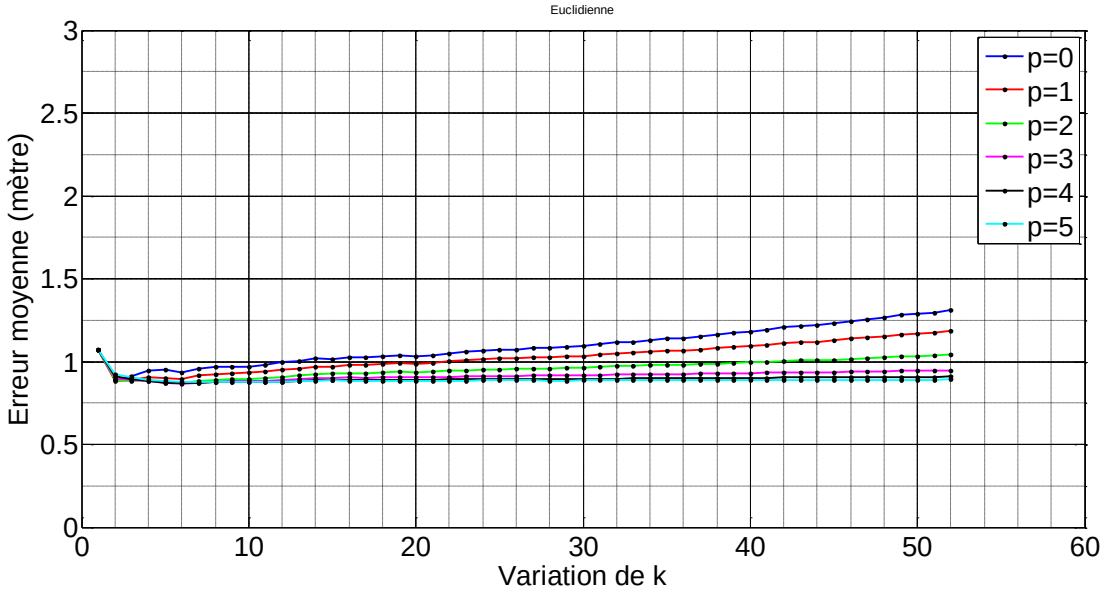


Figure 3.18 Erreur moyenne (mètre) de 70 points en utilisant la distance Euclidienne pour différents valeurs de k et p (1er essai , 0.5 m avec 171références).

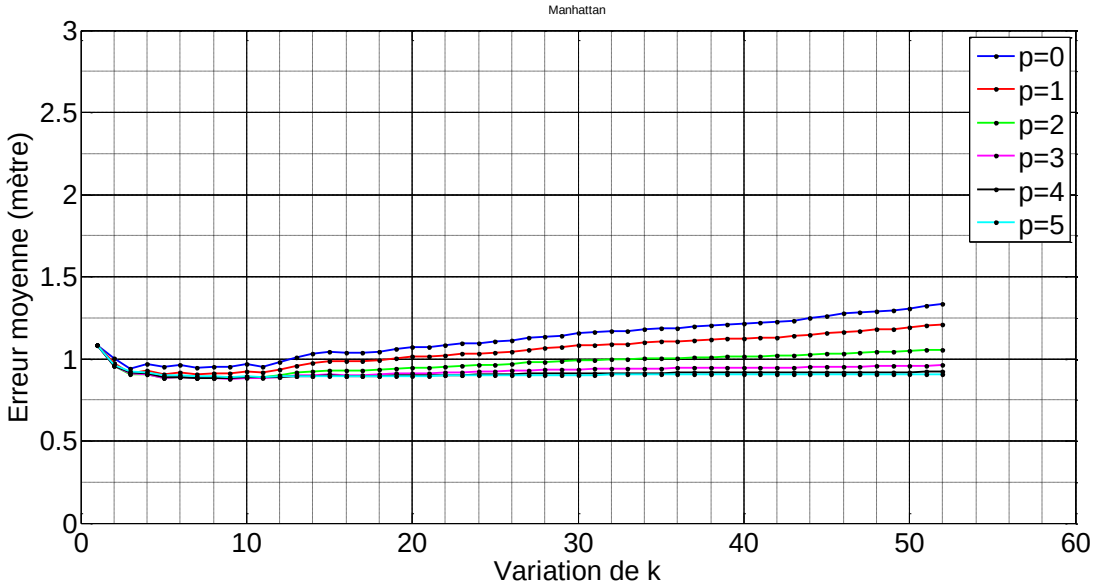


Figure 3.19 Erreur moyenne (mètre) de 70 points en utilisant la distance Manhattan pour différents valeurs de k et p (1er essai, 0.5 m avec 171 références).

3.3.3.4. Discussion

Pour les résultats obtenus dans le 1er essai, on remarque que les choix de la distance (Euclidienne ou Manhattan), de p et de k, influent de la même manière que dans la simulation, c'est-à-dire que les graphes de la méthode Euclidienne et celles de Manhattan sont presque superposés avec une différence négligeable. On remarque aussi que pour des valeurs de p plus grandes, l'erreur moyenne se stabilise et k ne devient pas un impact significatif sur l'erreur.

La seule différence entre la simulation et cet essai est que l'erreur moyenne min dans ce dernier est supérieure à l'erreur moyenne min trouvé dans la simulation. Les tableaux 3.6 et 3.7 résument les résultats obtenus.

Distance Euclidienne	Erreur Moyenne min (1m)	Erreur moyenne min (0.5m)
Simulation	0.46 m	0.37 m
1er essai	0.94 m	0.87 m

Tableau 3.6 Comparaison entre simulation et 1er essai (Distance Euclidienne)

Distance Manhattan	Erreur Moyenne min (1m)	Erreur moyenne min (0.5m)
Simulation	0.47 m	0.37 m
1er essai	0.99 m	0.88 m

Tableau 3.7 Comparaison entre simulation et 1er essai (Distance Manhattan)

Pour consulter les résultats du positionnement en utilisant le programme de la localisation avec les paramètres qui donne les meilleurs résultats (distance euclidienne, k=8, p=4), voir l'**Annexe J**.

3.3.4. Conclusion 2

D'après les résultats présentés dans les tableaux ci-dessous, on remarque qu'il y a une grande différence dans l'erreur moyenne min, environ 0.5m, entre la simulation et le 1er essai, cette différence est due aux variation de valeur RSSI d'un point et son adjacent à cause de bruit et de multi trajets, cette variation est constante pour tous les points dans la simulation, mais dans la pratique cette variation est plus grande et diffère d'un emplacement à un autre dans la même salle. Par exemple le point (0 3) a une valeur RSSI de -54 dBm et son adjacent, le point (1 3) a une valeur RSSI de -85 dBm.

3.3.5. 2ème Essai

3.3.5.1. Environnement de l'Expérimentation

Le 2ème essai a été déroulé dans le magasin du l'université Dr. YAHIA Fares de Médéa (pôle), ce magasin contient plusieurs obstacles métalliques et non métalliques

(archives, armoires métallique, chaises, tables, produits de nettoyage, …etc), Pour une vision plus claire de la salle voir la figure 3.20. On n'a pas utilisé toute la salle mais juste une zone de dimensions (5 x 8) m^2 comme illustré dans la figure 3.21.



Figure 3.20 l'environnement du 2ème essai

3.3.5.2. Phase 1 : Base de Données

Avant de remplir la base de données, on a décidé de travailler avec 4 nœuds lecteur, L1, L2, L3 et L4, leurs coordonnées sont (0.5 0.5), (4.5 0.5), (0.5 7.5) et (4.5 7.5) respectivement, et 54 nœuds référence, distribuées d'une manière régulière pour couvrir toute la zone de localisation comme illustré dans la figure 3.21.

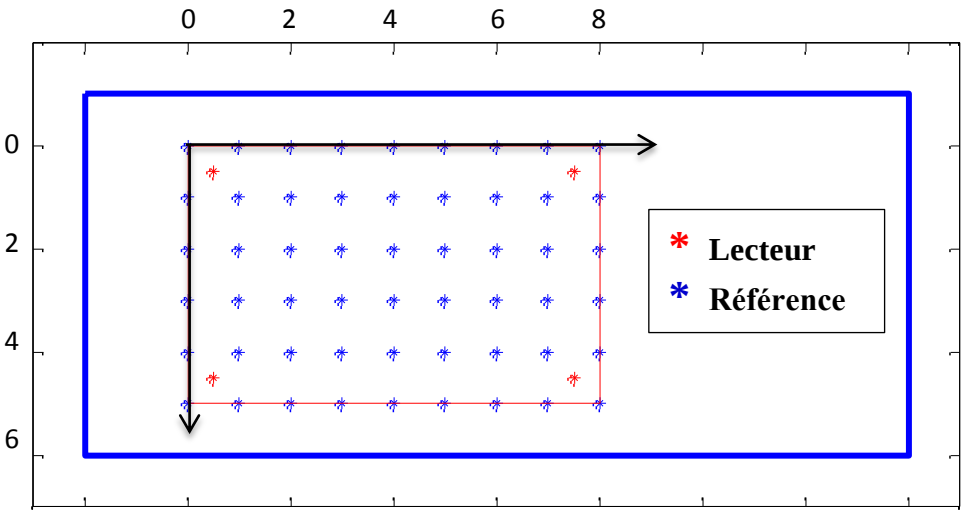


Figure 3.21 Distribution des nœuds références et lecteurs dans la zone de localisation

Le remplissage de la base de données avec les informations de RSSI est fait de la même manière du 1er essai en suivant les mêmes étapes.

3.3.5.3. Phase 2 : Localisation

Dans cet essai on a choisi aléatoirement 30 nœuds cible dispersés dans toute la zone de localisation, ces positions et leurs RSSI se trouvent dans l'**Annexe I**.

Les résultats des erreurs moyennes sont représentés sur les figures 3.22 et 3.23.

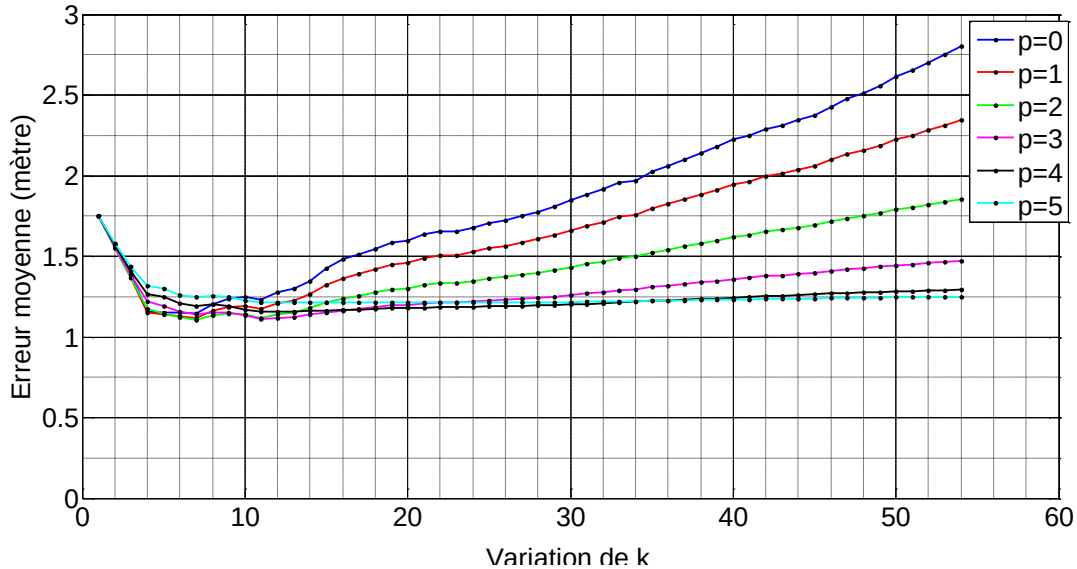


Figure 3.22 Erreur moyenne (mètre) de 30 points en utilisant la distance Euclidienne pour différents valeurs de k et p (2ème essai).

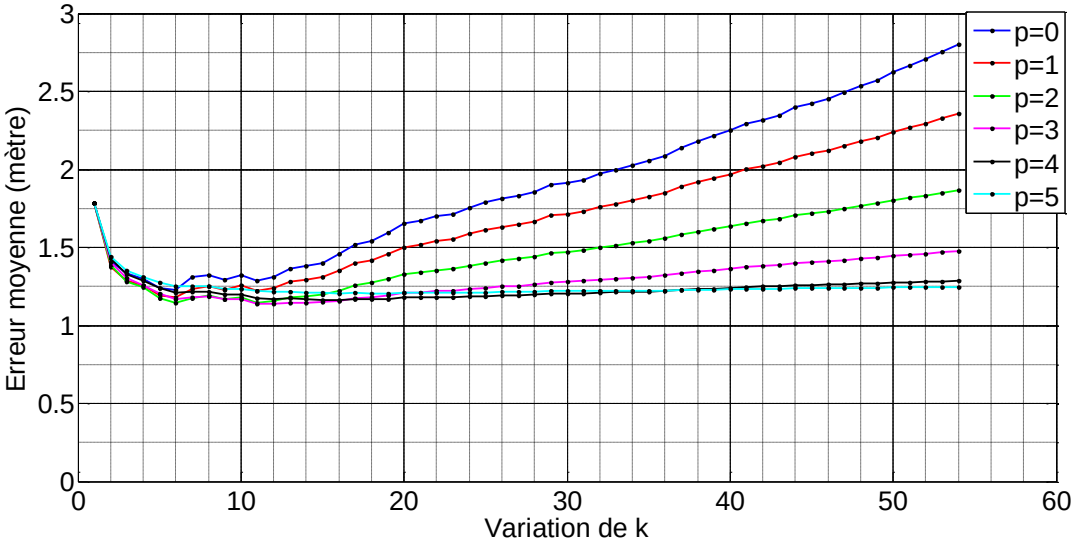


Figure 3.23 Erreur moyenne (mètre) de 30 points en utilisant la distance Manhattan pour différents valeurs de k et p (2ème essai).

3.3.5.4. Discussion des Résultats

La différence entre le 1er essai et le 2ème est que l'erreur moyenne min dans ce dernier est supérieure à l'erreur moyenne min trouvé dans le 1er essai. Les tableaux 3.8 et 3.9 résument les résultats obtenus.

Distance Euclidienne	Erreur Moyenne min (1m)
1er essai	0.94 m
2éme essai	1.11 m

Tableau 3.8 Comparaison entre le 1er essai et le 2ème essai (Distance Euclidienne)

Distance Manhattan	Erreur Moyenne min (1m)
1er essai	0.99 m
2éme essai	1.14 m

Tableau 3.9 Comparaison entre le 1er essai et le 2ème essai (Distance Manhattan)

Pour consulter les résultats du positionnement en utilisant le programme de la localisation, voir l'**Annexe K**.

3.3.6. Conclusion 3

D'après les résultats présentés dans les tableaux ci-dessous, on remarque qu'il y a un écart entre le 1er essai et le 2ème essai dans l'erreur moyenne min, environ 0.15m, cet écart est due au différence dans les caractéristiques des deux environnements, le 1er environnement est une salle vide, par contre le deuxième environnement .contient beaucoup d'obstacles métalliques comme mentionnée précédemment, ces derniers jouent le rôle des réflecteurs, ce qui augmente l'effet des multi trajets beaucoup plus que le premier environnement et ceci influe sur les RSSI reçus.

Conclusion Générale

La localisation des capteurs est un problème crucial dans les réseaux de capteurs, notamment dans les endroits fermés. Pour le résoudre, la méthode de fingerprinting nous permet d'estimer les positions inconnues des capteurs, à partir des empreintes de l'environnement d'intérêt.

La méthode de fingerprinting est réalisée en deux phases. La première phase nécessite une étude du site pour créer une base de données qui contient des valeurs RSSI provenant à partir des nœuds références placés dans certaines positions. Dans la deuxième phase, la position d'un nœud cible est déterminé en comparant son RSSI, avec les informations disponible dans la base de données.

A partir des résultats obtenus dans les expériences, on peut conclure que la précision de localisation en utilisant le fingerprinting est associée aux critères suivants :

- L'environnement : l'erreur obtenue dans une salle contenant plusieurs obstacles sera plus grand par rapport à une salle qui contient moins d'obstacles.
- Volume de la base de données : une base de données grande donne moins d'erreur par rapport à une autre plus petite, mais cela se fait au détriment du temps de traitement et la taille de la mémoire utilisée.
- Le programme de positionnement : le choix des paramètres du programme (k, p, distance Euclidienne ou Manhattan) influe directement sur la précision de localisation, comme on peut le voir sur les graphes obtenue, donc il faut prudemment choisir ces paramètres pour une précision plus grande.

Liste des Références

[1] DAVID Sébastien, MOCCI Christophe, ‘’TER AD HOC” Master 2 SIR 2005/2006.

[2] MOAD Sofiane. " La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil", Master Recherche 2 en Informatique IFSIC-Rennes 1, 2007/2008.

[3] HOUNGBADJI Thérence " Réseaux Ad Hoc: Système D‘Adressage Et Méthodes D‘Accessibilité Aux Données " Philosophiæ Doctor , Génie Informatique Université De Montréal 2009.-

[4] S. Farahani, “Zigbee Wireless Networks and Tranceivers”, 2008.

[5] Y. Wang, G. Attebury, B. Ramamurthy, “A Survey of Security Issues In Wireless Sensor Networks”, University of Nebraska – Lincoln, 2006.

[6] K. Römer, F. Mattern,” The Design Space of Wireless Sensor Networks ”, Institute for Pervasive Computing ETH Zurich, 2004.

[7] A. Boukerche, “Algorithms and protocols in wireless sensor networks”, university of Ottawa Canada, 2009.

[8] CHALLAL Yacine. « Réseaux de Capteurs Sans Fils », support de cours, 2008.

[9] Martin Bor, “Indoor Localization for Wireless Sensor Networks”, Master Of Science, Delft University of Technology, 2009

[10] C.Chin Pu, C.Hsian Pu, and H.Jae Lee,” Indoor Location Tracking using Received Signal Strength Indicator”, Sunway University College, Taylor’s University College, Dongseo University , Malaysia, South Korea

[11] Hakan Koyuncu, Shuang Hua Yang, “A 2D positioning system using WSNs in indoor environment”, Computer Science Department, Loughborough University,2011

[12] H. TAYAKOUT . B. FERGANI, “Application de la méthode k-ppv pour la localisation et le suivi en environnement fermé de Tags RFID”, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédienne, El Alia, Bab Ezzouar, Alger, (Algérie),

[13] Mihaela Cardei, Ionut Cardei, Ding-Zhu Du, “Resource Management in Wireless Networking”, 2005, google livres .

[14] N. Priyantha, A. Miu, H. Balakrishnan, and S. Teller, “The cricket compass for context-aware mobile applications”, 2001, Rome, Italy.

[15] Messaoud KARA, “Réseau de capteurs sans fil : Etude en vue de la réalisation

d’un récepteur GPS différentiel à faible coût", THÈSE doctorat, Université Blaise Pascal, 2009.

[16] M. M. Patil, U. Shaha, U. B. Desai, S. N. Merchant, " Localization in Wireless Sensor Networks using Three Masters”, Indian Institute Of Technology, Bombay, 2005.

[17] Holger Karl, Andreas Willig, “Protocols And Architectures For Wireless Sensor Networks”,Wiley, 2005.

[18] Erin-Ee-Lin Lau, Boon-Giin Lee, Seung-Chul Lee, Wan-Young Chung, “ Enhanced RSSIBased High Accuracy Real-Time user Location Tracking System For Indoor And Outdoor Environments ”, International Journal On Smart Sensing And Intelligent Systems, VOL. 1, NO. 2, June 2008.

[19] Seung-chan Shin, Byung-rak Son, Won-geun Kim and Jung-gyu Kim, “ERFS: Enhanced RSSI value Filtering Schema for Localization in Wireless Sensor Networks‖, in IFIP International Federation for Information Processing, Volume 264; Wireless Sensor and Actor Networks II”; Ali Miri; (Boston: Springer), 2008.

[20] Guide d’utilisateur pour le kit de développement zigbee CC2530 de Texas Instruments, swru209b. Disponible sur le lien: http://www.ti.com/lit/ug/swru209b/swru209b.pdf

[21] E. Çayırcı, C. Rong, « Security in Wireless Ad Hocand Sensor Networks » 2009 John Wiley & Sons, Ltd.

[22] H. D. Chinh, Dr. Y. kheng tan, “Smart Wireless Sensor Networks”, 2010 InTech.

[23] Batou,’’ Les objets communicants’’, Version 1.0, 13 mai 2011.

Annexe

Annexe A: programme de localisation

```
clc
hold on;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        %partie 1 : les positions  des lecteurs et references%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
lecteur=4; %Nbr de lecteur
reference=54;%Nbr de reference
xr= [0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2
3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5 0 1 2 3 4 5];% coordonnées x références
yr= [0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 5 5 5
5 5 5 6 6 6 6 6 6 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 8 8];% coordonnées y références
xl= [ 0.5 4.5 0.5 4.5 ];% coordonees x lecteurs
yl= [ 0.5 0.5 4.5 4.5 ];% coordonees y lecteurs
plot(xl,yl,'*g');hold on;
plot(xr,yr,'o','MarkerFaceColor','r');
axis equal;axis([-1 6 -1 10]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
            % partie 2: remplissage de la base de donnees %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%------------ A: distance entre lecteur et reference(metre)----------%
dis_euc= zeros(reference,lecteur);
for i=1:reference
    for j=1:lecteur
        dis_euc(i,j)=sqrt((xr(i)-xl(j)).^2+(yr(i)-yl(j)).^2);%la
distance entre references et lecteurs(metre)
    end
end

%-------------- B : la base de donnees de RSSI references-----------%
alfa=2; %coefficient de pathloss
Pt=0;%dbm
PL_d0=41.5; %dBm
d0=1;%m
Pathloss=PL_d0+(10*alfa*(log10(dis_euc./d0)));%les pathloss des noeuds
references
RSSI=zeros(reference,lecteur);
for i=1:reference
    for j=1:lecteur
       RSSI(i,j)=Pt-Pathloss(i,j)+randn; %base de donnee RSSI des
references en dbm

    end
end



%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                    % partie 3: la localisation %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
 %---------------------- [ A : RSSI de cible ]-----------------------%
reponse=char('oui');
while reponse=='oui'
     xinc=input('x reel: ');% coordonee x reel de l'inconnu
     yinc=input('y reel: ');% coordonee y reel de l'inconnu
     dis_reel= zeros(1,lecteur);
     dis_reel(1:lecteur)=sqrt((xl(1:lecteur)-xinc).^2+(yl(1:lecteur)-
yinc).^2);%la distance entre inconnu et lecteurs(metre)
     pathloss1=PL_d0+(10*alfa*(log10(dis_reel./d0)));%les pathloss de
noeud inconnu
     RSSI_inc(1:lecteur) = Pt - pathloss1(1:lecteur)+randn ;%calcul de
RSSI de noeud inconnu en dBm

%[ B :calcul la distance euc ou manha entre RSSI references et cible ]
     t=input('quel distance voulez vous choisire? tapez 1 pour
Euclidienne ou 2 pour Manhatan');
     Dis=zeros(1,reference);
     for m=1:reference
        Dis(m)=(sum(abs( RSSI_inc(1:lecteur)-
(RSSI(m,1:lecteur))).^t)).^(1/t);%le vecteur de la distance euc (Watt)
     end

%----------- [ C : estimation de position de noeud cible ]-----------%
     k=input('k: ');
     n=input('coefficient de puissance w: ');
     [A,I]=sort(Dis,'ascend');% tri de vecteur de la Dis_Euc2 par
ordre croissant
     if A(1)==0;%si Dis_Euc2=0 position estime = positiion reference%
           x1=xr(I(1));% x estime = x de 1er reference dans le vecteur
trie
           y1=yr(I(1));% x estime = y de 1er reference dans le vecteur
trie
     else%sinon calcul de poids de chaq voisin et estimation de posi
           w=(1./((A(1:k)).^n))./sum(1./(A(1:k)).^n);% voir document
bebzouar
           x1=sum(w(1:k).*xr(I(1:k)));% x estime
           y1=sum(w(1:k).*yr(I(1:k)));% y estime
     end
            eqm=sqrt((x1-xinc)^2+(y1-yinc)^2);%erreur quadratiq moy de
l'estimation
 %----------------[ D : affichage de resultats  ]--------------------%
  disp('----------Resultats----------')
  disp(['x estimé = ',num2str(x1),'m',' y estimé =
',num2str(y1),'m']);
  disp(['erreur: ',num2str(eqm),' m']);
  plot(xinc,yinc,'o','MarkerFaceColor','b');
  plot(x1,y1,'o','MarkerFaceColor','k');
  plot([xinc x1],[yinc y1],'-k'); grid minor;
  xlabel('l*axe des x'); ylabel('axe des y');
  legend('Positions lecteurs','Positions references','Position
reel','Position estimee');

  reponse=input('Réessayer ?(oui/non): ','s');%entrez 'oui' pour
essayer une autre foix
end
```

Annexe B: Erreur moyenne (mètre) de **546** points en utilisant la distance **Euclidienne** pour différents valeurs de **k** et **p**, pour une distance inter-référence égale à **1m**.

	P=0	P=1	P=2	P=3	P=4	P=5
k=1	0.6647	0.707	0.666	0.7124	0.6963	0.6942
k=2	0.5575	0.5462	0.5275	0.5454	0.5683	0.588
k=3	0.5129	0.4595	0.4987	0.5036	0.4981	0.5288
k=4	0.5497	0.5161	0.4918	0.4708	0.4735	0.523
k=5	0.5523	0.5061	0.458	0.4729	0.4967	0.5282
k=6	0.5955	0.4978	0.4729	0.4755	0.4801	0.4877
k=7	0.6071	0.5238	0.4795	0.4834	0.4936	0.4901
k=8	0.6146	0.5422	0.5148	0.4693	0.4844	0.5019
k=9	0.6597	0.5579	0.4957	0.4806	0.4996	0.4988
k=10	0.6944	0.5881	0.5096	0.4891	0.496	0.5218
k=11	0.7001	0.6023	0.5076	0.4805	0.4843	0.5154
k=12	0.7536	0.5986	0.5169	0.4813	0.4693	0.493
k=13	0.7872	0.6154	0.519	0.486	0.4939	0.5054
k=14	0.8299	0.654	0.5368	0.4884	0.4992	0.5255
k=15	0.8582	0.6683	0.5374	0.4973	0.4961	0.5178
k=16	0.8966	0.6891	0.5612	0.4937	0.491	0.4816
k=17	0.926	0.7138	0.5487	0.4841	0.4892	0.5265
k=18	0.9639	0.7263	0.5801	0.5329	0.506	0.5046
k=19	1.0084	0.7442	0.5632	0.5013	0.4935	0.4973
k=20	1.0483	0.7711	0.575	0.4961	0.4828	0.4735
k=21	1.0959	0.7844	0.5878	0.4804	0.4722	0.5338
k=22	1.1333	0.8341	0.585	0.4983	0.5252	0.5057
k=23	1.19	0.8568	0.5967	0.4891	0.4938	0.4997
k=24	1.239	0.8705	0.6203	0.5029	0.4898	0.4959
k=25	1.2859	0.9003	0.6064	0.5047	0.4727	0.4924
k=26	1.3375	0.9246	0.6147	0.4903	0.5019	0.5197
k=27	1.3857	0.9653	0.6415	0.5091	0.4985	0.5111
k=28	1.4278	0.9992	0.6566	0.5332	0.4946	0.5253
k=29	1.4922	1.0116	0.6701	0.5265	0.5343	0.5197
k=30	1.5232	1.0622	0.6769	0.5362	0.4972	0.501
k=31	1.5699	1.0671	0.6792	0.5248	0.4978	0.5153
k=32	1.6294	1.1172	0.6876	0.5664	0.4727	0.5109
k=33	1.6671	1.1466	0.7099	0.5293	0.4911	0.4717
k=34	1.7289	1.1704	0.7238	0.5386	0.516	0.5175
k=35	1.7832	1.1964	0.7268	0.5369	0.4993	0.5227
k=36	1.835	1.246	0.7447	0.5359	0.4921	0.5185
k=37	1.8952	1.2631	0.7556	0.5542	0.4834	0.5146
k=38	1.945	1.3099	0.7466	0.5349	0.5197	0.5199
k=39	1.9995	1.3357	0.7671	0.5442	0.5058	0.5052
k=40	2.0543	1.3679	0.7557	0.5562	0.5102	0.5262
k=41	2.0983	1.4001	0.799	0.5674	0.503	0.4842
k=42	2.1457	1.4465	0.812	0.5612	0.5044	0.4966
k=43	2.1868	1.4718	0.7934	0.5668	0.5187	0.5089
k=44	2.2449	1.5022	0.8479	0.5672	0.4911	0.5004
k=45	2.278	1.5356	0.8226	0.5674	0.4982	0.5106
k=46	2.3181	1.5293	0.841	0.5505	0.4964	0.5154
k=47	2.3486	1.5702	0.8589	0.5881	0.5155	0.515
k=48	2.3882	1.5942	0.8621	0.5679	0.5207	0.5104
k=49	2.4244	1.6102	0.8781	0.5657	0.5183	0.5045

k=50	2.4629	1.6367	0.8603	0.6018	0.5133	0.5204
k=51	2.5042	1.6625	0.8863	0.5908	0.5131	0.5003
k=52	2.5482	1.6903	0.9097	0.5684	0.5003	0.5115
k=53	2.5937	1.7255	0.8903	0.5818	0.5221	0.5013
k=54	2.6433	1.7381	0.8922	0.5691	0.5131	0.5274

Annexe C: Erreur moyenne (mètre) de **546** points en utilisant la distance **Manhattan** pour différents valeurs de **k** et **p**, pour une distance inter-référence égale à **1m**.

	p=0	**p=1**	**p=2**	**p=3**	**p=4**	**p=5**
k=1	0.6861	0.7106	0.6811	0.6977	0.6897	0.708
k=2	0.5709	0.527	0.5456	0.5478	0.5907	0.5715
k=3	0.544	0.506	0.5058	0.5016	0.5332	0.5346
k=4	0.5543	0.4984	0.4731	0.4873	0.519	0.5117
k=5	0.5479	0.5053	0.4658	0.4897	0.5177	0.5358
k=6	0.5561	0.5018	0.4899	0.4815	0.4778	0.5156
k=7	0.5903	0.5215	0.474	0.4972	0.4931	0.5218
k=8	0.6349	0.5385	0.486	0.4714	0.4854	0.5322
k=9	0.6533	0.5866	0.5181	0.5042	0.5066	0.5015
k=10	0.6938	0.5776	0.4948	0.4742	0.4817	0.4924
k=11	0.7007	0.5901	0.5082	0.49	0.5063	0.5047
k=12	0.7745	0.6117	0.5239	0.5036	0.5192	0.5178
k=13	0.7832	0.6257	0.5257	0.4902	0.4974	0.5234
k=14	0.8254	0.6546	0.5433	0.4981	0.4864	0.5228
k=15	0.8713	0.6755	0.5348	0.4937	0.4878	0.4962
k=16	0.911	0.6781	0.5331	0.4915	0.4915	0.4952
k=17	0.9578	0.7106	0.5469	0.5013	0.5112	0.5217
k=18	0.9984	0.7346	0.5674	0.4947	0.5072	0.5101
k=19	1.053	0.7798	0.5612	0.486	0.4956	0.4969
k=20	1.0806	0.7926	0.5659	0.5172	0.4809	0.5274
k=21	1.1489	0.8213	0.6085	0.5165	0.5001	0.5175
k=22	1.198	0.8354	0.5891	0.5055	0.4921	0.5306
k=23	1.2457	0.8806	0.6188	0.5149	0.4946	0.5257
k=24	1.2864	0.8983	0.6069	0.5248	0.4997	0.532
k=25	1.3639	0.9305	0.6391	0.519	0.4974	0.501
k=26	1.4041	0.9748	0.6401	0.5378	0.5177	0.5309
k=27	1.4545	0.9873	0.6354	0.5171	0.5169	0.5222
k=28	1.5028	1.0245	0.6627	0.5348	0.485	0.5463
k=29	1.5494	1.0695	0.6685	0.5374	0.5217	0.5264
k=30	1.5879	1.1133	0.6871	0.5268	0.501	0.518
k=31	1.6573	1.1107	0.6744	0.5571	0.5197	0.5273
k=32	1.7051	1.1523	0.6984	0.5381	0.5117	0.5418
k=33	1.77	1.1898	0.7274	0.5506	0.5315	0.5145
k=34	1.8001	1.2177	0.7172	0.5346	0.5095	0.5334
k=35	1.8578	1.238	0.7517	0.5542	0.5176	0.4954
k=36	1.9119	1.2811	0.7474	0.5646	0.5141	0.532
k=37	1.9541	1.3295	0.7716	0.5529	0.4977	0.5224
k=38	2.0105	1.3433	0.7661	0.5406	0.5053	0.5213
k=39	2.0658	1.3917	0.7847	0.5563	0.5126	0.5172
k=40	2.0851	1.4106	0.8021	0.5598	0.4904	0.5213
k=41	2.1352	1.4368	0.8124	0.5421	0.5171	0.5048
k=42	2.1763	1.4608	0.8288	0.564	0.516	0.5285

k=43	2.2151	1.4885	0.839	0.555	0.5094	0.5321
k=44	2.2596	1.5131	0.8236	0.5587	0.4893	0.5027
k=45	2.2954	1.55	0.8482	0.5623	0.4993	0.5136
k=46	2.3343	1.5601	0.8656	0.5526	0.5185	0.5142
k=47	2.3744	1.5901	0.8635	0.5715	0.5089	0.5169
k=48	2.4077	1.6193	0.8679	0.5735	0.5247	0.5357
k=49	2.4459	1.6388	0.8852	0.568	0.4943	0.5452
k=50	2.4846	1.6602	0.9126	0.5781	0.5131	0.5388
k=51	2.5243	1.6845	0.8904	0.5589	0.5176	0.5033
k=52	2.558	1.6988	0.9	0.5821	0.5225	0.5347
k=53	2.5992	1.7279	0.9045	0.5803	0.5199	0.5406
k=54	2.6433	1.7478	0.9154	0.5889	0.5154	0.5144

<u>Annexe D:</u> Erreur moyenne (mètre) de **546** points en utilisant la distance **Euclidienne** pour différents valeurs de **k** et **p**, pour une distance inter-référence égale à **0.5m**.

	p=0	**p=1**	**p=2**	**p=3**	**p=4**	**p=5**
k=1	0.5767	0.5513	0.582	0.56	0.586	0.5625
k=2	0.4543	0.4526	0.4466	0.4432	0.4613	0.4522
k=3	0.4216	0.4094	0.4	0.4259	0.4165	0.4266
k=4	0.3896	0.3999	0.4005	0.3948	0.3979	0.4314
k=5	0.404	0.3837	0.3807	0.386	0.4128	0.4175
k=6	0.4058	0.3837	0.3808	0.3788	0.3958	0.4163
k=7	0.4133	0.3859	0.3777	0.3698	0.4018	0.3982
k=8	0.4139	0.3887	0.3691	0.392	0.3965	0.3975
k=9	0.4214	0.3963	0.3844	0.3853	0.375	0.396
k=10	0.4201	0.3962	0.3832	0.3785	0.3916	0.3896
k=11	0.4398	0.4038	0.3806	0.3848	0.3775	0.3908
k=12	0.4445	0.4007	0.3842	0.3786	0.3817	0.3829
k=13	0.4489	0.4052	0.3889	0.3837	0.3814	0.3951
k=14	0.4586	0.418	0.3905	0.3732	0.3695	0.4043
k=15	0.461	0.4148	0.3811	0.3794	0.3895	0.3978
k=16	0.4791	0.4304	0.3999	0.3814	0.3823	0.3868
k=17	0.4832	0.4355	0.404	0.3807	0.3826	0.3873
k=18	0.5029	0.4387	0.4042	0.3736	0.3961	0.4054
k=19	0.5073	0.4514	0.4011	0.3871	0.3682	0.3971
k=20	0.5217	0.4565	0.4037	0.3754	0.3832	0.405
k=21	0.5333	0.4585	0.4049	0.3813	0.3748	0.3936
k=22	0.5379	0.4707	0.4113	0.389	0.3745	0.3762
k=23	0.5512	0.4752	0.4131	0.3885	0.3857	0.3857
k=24	0.5628	0.4831	0.421	0.3827	0.3812	0.394
k=25	0.5762	0.4929	0.4174	0.3905	0.3842	0.3819
k=26	0.5811	0.4915	0.4213	0.3969	0.3743	0.3871
k=27	0.5948	0.5013	0.4302	0.3792	0.3851	0.3904
k=28	0.6028	0.5095	0.4242	0.3921	0.3933	0.3946
k=29	0.6125	0.5108	0.4382	0.3982	0.3875	0.4069
k=30	0.6233	0.5224	0.4331	0.3859	0.4003	0.4009
k=31	0.6324	0.5269	0.4344	0.3816	0.3902	0.4156
k=32	0.6437	0.5351	0.4297	0.3936	0.396	0.4047
k=33	0.6521	0.5382	0.4352	0.3987	0.3927	0.3882
k=34	0.6685	0.5473	0.4421	0.3942	0.4008	0.3822
k=35	0.6788	0.5498	0.4377	0.4008	0.3943	0.3853

k=36	0.6865	0.5623	0.4345	0.4049	0.3899	0.3948
k=37	0.7013	0.5659	0.4461	0.3979	0.3952	0.3839
k=38	0.7156	0.5715	0.453	0.3928	0.386	0.3923
k=39	0.7254	0.5811	0.4593	0.3973	0.3897	0.4007
k=40	0.739	0.5962	0.4637	0.4051	0.3904	0.4068
k=41	0.746	0.5883	0.4668	0.4063	0.3869	0.3976
k=42	0.7663	0.5994	0.4674	0.3973	0.3973	0.3992
k=43	0.7794	0.6053	0.4743	0.3933	0.3848	0.4121
k=44	0.7911	0.6119	0.4788	0.4035	0.3923	0.394
k=45	0.8032	0.6249	0.4708	0.4138	0.3934	0.3927
k=46	0.8185	0.6299	0.479	0.4112	0.388	0.4073
k=47	0.8331	0.644	0.4788	0.4021	0.3933	0.3932
k=48	0.8488	0.6574	0.4788	0.4161	0.3762	0.3901
k=49	0.8677	0.6588	0.4864	0.409	0.3905	0.3852
k=50	0.8711	0.6652	0.4896	0.4049	0.3789	0.4056
k=51	0.89	0.6685	0.4953	0.4195	0.3875	0.3959
k=52	0.9085	0.6859	0.4911	0.4036	0.3796	0.3775
k=53	0.9183	0.6854	0.5006	0.4029	0.3856	0.395
k=54	0.9332	0.6986	0.5001	0.4139	0.3835	0.4024
k=55	0.948	0.7089	0.5079	0.413	0.3877	0.394
k=56	0.961	0.7117	0.511	0.4165	0.3859	0.3816
k=57	0.9743	0.7205	0.5011	0.4263	0.3985	0.3907
k=58	0.988	0.7285	0.5071	0.4073	0.4035	0.3964
k=59	1.0039	0.7387	0.5137	0.4157	0.3908	0.3882
k=60	1.0173	0.7491	0.5231	0.4129	0.4066	0.3927
k=61	1.031	0.7592	0.5213	0.4141	0.3926	0.3865
k=62	1.0476	0.7641	0.5237	0.4202	0.3964	0.3995
k=63	1.0616	0.7748	0.527	0.4199	0.3879	0.3876
k=64	1.0747	0.7821	0.527	0.4187	0.3889	0.3853
k=65	1.0937	0.7924	0.5319	0.4207	0.3933	0.4087
k=66	1.1091	0.8088	0.5341	0.4186	0.3951	0.387
k=67	1.1224	0.8123	0.5429	0.4219	0.3966	0.3963
k=68	1.1381	0.8243	0.5478	0.4204	0.3918	0.3997
k=69	1.1538	0.8344	0.5444	0.4265	0.4065	0.3969
k=70	1.1666	0.8438	0.5476	0.4233	0.4026	0.4054
k=71	1.1826	0.8534	0.5616	0.4245	0.3938	0.4082
k=72	1.1956	0.8609	0.5493	0.4217	0.4092	0.3909
k=73	1.2102	0.8693	0.552	0.4333	0.3972	0.4089
k=74	1.2261	0.8825	0.5749	0.418	0.4	0.3871
k=75	1.2368	0.8871	0.5735	0.4236	0.3955	0.3957
k=76	1.2549	0.8957	0.5664	0.4233	0.3966	0.4021
k=77	1.2629	0.9092	0.5744	0.4276	0.3988	0.3916
k=78	1.2762	0.9184	0.5795	0.4267	0.3999	0.4006
k=79	1.291	0.9259	0.5741	0.4211	0.3775	0.3899
k=80	1.3028	0.9326	0.5894	0.4207	0.4028	0.3913
k=81	1.3162	0.9399	0.5876	0.4279	0.3952	0.4028
k=82	1.329	0.9498	0.5871	0.439	0.4055	0.4103
k=83	1.3426	0.9569	0.6007	0.4398	0.4027	0.388
k=84	1.3517	0.967	0.595	0.4332	0.4061	0.3919
k=85	1.3637	0.9732	0.6014	0.4359	0.3959	0.4089
k=86	1.3795	0.9827	0.6043	0.4281	0.4018	0.3831
k=87	1.388	0.9931	0.6042	0.4355	0.3963	0.3957
k=88	1.4024	0.9997	0.6167	0.4263	0.393	0.395
k=89	1.4105	1.0077	0.6006	0.4367	0.3964	0.3961
k=90	1.4218	1.0189	0.6071	0.4378	0.3923	0.4009

k=91	1.4321	1.0192	0.6139	0.4399	0.4033	0.4025
k=92	1.4455	1.0274	0.6297	0.4427	0.4085	0.4008
k=93	1.455	1.0412	0.6247	0.4406	0.3994	0.404
k=94	1.4673	1.0464	0.6264	0.4329	0.4011	0.3902
k=95	1.4781	1.0576	0.6244	0.4428	0.3911	0.4157
k=96	1.489	1.063	0.6351	0.4476	0.3971	0.4052
k=97	1.4972	1.0627	0.6376	0.4508	0.392	0.3995
k=98	1.5101	1.0802	0.6374	0.4391	0.3909	0.3991
k=99	1.5193	1.0832	0.6415	0.4321	0.4057	0.3882
k=100	1.5313	1.0904	0.6424	0.4482	0.4093	0.4011
k=101	1.5415	1.0964	0.6514	0.4542	0.4071	0.4085
k=102	1.5515	1.1049	0.6382	0.4486	0.4139	0.4068
k=103	1.5607	1.1148	0.6611	0.4532	0.4206	0.3913
k=104	1.5704	1.123	0.6637	0.4435	0.3989	0.3966
k=105	1.5807	1.1282	0.6603	0.4455	0.3937	0.39
k=106	1.5918	1.1438	0.6537	0.451	0.4069	0.4033
k=107	1.601	1.1421	0.6597	0.4445	0.4005	0.3925
k=108	1.6117	1.1497	0.6714	0.4546	0.3937	0.3981
k=109	1.6217	1.1502	0.6705	0.4488	0.4107	0.3963
k=110	1.6307	1.1644	0.6723	0.4479	0.4035	0.4057
k=111	1.6413	1.171	0.688	0.4432	0.4063	0.4052
k=112	1.6539	1.1799	0.6763	0.453	0.4066	0.3928
k=113	1.6625	1.1888	0.6813	0.4472	0.4093	0.4152
k=114	1.6734	1.1952	0.677	0.4442	0.4011	0.3993
k=115	1.6848	1.1989	0.6842	0.4373	0.4073	0.4035
k=116	1.6979	1.2103	0.6901	0.4572	0.4034	0.4102
k=117	1.7078	1.2147	0.6922	0.4579	0.3964	0.4011
k=118	1.7199	1.228	0.703	0.4629	0.4013	0.394
k=119	1.7284	1.2331	0.6971	0.4592	0.3883	0.4075
k=120	1.7387	1.2402	0.7013	0.4617	0.3886	0.4044
k=121	1.7474	1.242	0.6978	0.4557	0.399	0.4043
k=122	1.7576	1.2492	0.702	0.4549	0.4027	0.4013
k=123	1.7677	1.2583	0.7077	0.4507	0.4071	0.3966
k=124	1.776	1.2653	0.711	0.4565	0.4024	0.396
k=125	1.7864	1.2775	0.7143	0.4697	0.4147	0.4061
k=126	1.7984	1.2817	0.7167	0.4528	0.3934	0.3946
k=127	1.8087	1.2911	0.7162	0.4538	0.4121	0.381
k=128	1.8195	1.2929	0.7283	0.4486	0.4141	0.4032
k=129	1.831	1.3008	0.7175	0.4624	0.414	0.4018
k=130	1.8421	1.3042	0.7156	0.46	0.4017	0.4081
k=131	1.852	1.3164	0.7429	0.4521	0.3971	0.3919
k=132	1.8624	1.3199	0.7289	0.4609	0.4044	0.4253
k=133	1.8722	1.3241	0.7322	0.4506	0.401	0.3794
k=134	1.8842	1.3412	0.7398	0.4585	0.4033	0.409
k=135	1.8961	1.3453	0.7345	0.4692	0.391	0.4019
k=136	1.9086	1.3516	0.7527	0.4754	0.3926	0.4026
k=137	1.9195	1.3565	0.7426	0.4713	0.3933	0.4185
k=138	1.9323	1.3669	0.7572	0.4707	0.4082	0.3879
k=139	1.9437	1.3663	0.7505	0.4669	0.4076	0.3916
k=140	1.9572	1.377	0.7761	0.4676	0.3996	0.3968
k=141	1.9708	1.3895	0.7584	0.4656	0.3981	0.3971
k=142	1.9816	1.3981	0.7586	0.4739	0.409	0.4022
k=143	1.9956	1.4066	0.7745	0.4611	0.4043	0.402
k=144	2.0089	1.4119	0.7586	0.4564	0.3927	0.3933
k=145	2.0234	1.4203	0.762	0.4608	0.383	0.4027

k=146	2.0364	1.4222	0.7599	0.4643	0.4033	0.4088
k=147	2.0492	1.429	0.7723	0.4571	0.4116	0.3991
k=148	2.0614	1.4318	0.7574	0.4658	0.402	0.3957
k=149	2.0752	1.4478	0.7784	0.472	0.4055	0.388
k=150	2.0889	1.4567	0.7942	0.4729	0.4074	0.4029
k=151	2.103	1.4627	0.7766	0.4819	0.4094	0.4104
k=152	2.117	1.471	0.786	0.4729	0.3946	0.3951
k=153	2.1324	1.4793	0.7941	0.47	0.4095	0.4002
k=154	2.1478	1.4835	0.7817	0.4666	0.3964	0.3916
k=155	2.1624	1.4909	0.8062	0.4803	0.4004	0.3918
k=156	2.1788	1.5041	0.7959	0.4733	0.3822	0.383
k=157	2.1941	1.5124	0.8162	0.476	0.407	0.375
k=158	2.2091	1.5223	0.8033	0.4662	0.4159	0.4032
k=159	2.2241	1.5251	0.7994	0.4629	0.3876	0.4102
k=160	2.2386	1.5381	0.8039	0.479	0.4148	0.3986
k=161	2.254	1.5428	0.8092	0.4736	0.4272	0.3849
k=162	2.2698	1.5436	0.8013	0.4713	0.3941	0.4043
k=163	2.287	1.5574	0.8234	0.4721	0.4006	0.4064
k=164	2.3037	1.565	0.8171	0.4837	0.4087	0.4131
k=165	2.3202	1.5698	0.8218	0.4775	0.4117	0.3969
k=166	2.3364	1.5856	0.8048	0.4876	0.4069	0.4096
k=167	2.3521	1.593	0.8253	0.4981	0.3942	0.3976
k=168	2.3673	1.5968	0.8343	0.4799	0.3958	0.3904
k=169	2.3853	1.6085	0.8296	0.4825	0.3912	0.4002
k=170	2.4028	1.6215	0.8472	0.4748	0.4132	0.4007
k=171	2.4182	1.6326	0.8277	0.4793	0.401	0.4099
k=172	2.4328	1.6422	0.8278	0.4829	0.3937	0.3938
k=173	2.4481	1.6422	0.8299	0.4793	0.409	0.4159
k=174	2.4615	1.6548	0.8364	0.4805	0.3843	0.3913
k=175	2.4763	1.6539	0.8333	0.4726	0.4092	0.4083
k=176	2.4901	1.6716	0.8483	0.476	0.3998	0.4022
k=177	2.5042	1.6776	0.8599	0.4881	0.3996	0.4017
k=178	2.5181	1.6757	0.852	0.4764	0.3933	0.3931
k=179	2.5317	1.6896	0.8519	0.4725	0.3895	0.3999
k=180	2.5418	1.6887	0.8512	0.4832	0.4115	0.4233
k=181	2.5532	1.6999	0.8568	0.4831	0.4154	0.4062
k=182	2.5669	1.7147	0.8689	0.4831	0.4098	0.4107
k=183	2.5799	1.7191	0.8596	0.4739	0.4022	0.4
k=184	2.5945	1.72	0.875	0.4736	0.3988	0.3901
k=185	2.6086	1.7285	0.854	0.4809	0.404	0.4189
k=186	2.6253	1.7359	0.8823	0.4987	0.3881	0.4013
k=187	2.6433	1.7495	0.8471	0.4935	0.4093	0.4066
min	0.3896	0.3837	0.3691	0.3698	0.3682	0.375
max	2.6433	1.7495	0.8823	0.56	0.586	0.5625

Annexe E: Erreur moyenne (mètre) de **546** points en utilisant la distance **Manhattan** pour différents valeurs de **k** et **p**, pour une distance inter-référence égale à **0.5m**.

	p=0	**p=1**	**p=2**	**p=3**	**p=4**	**p=5**
k=1	0.5881	0.5676	0.5821	0.5863	0.5838	0.5669
k=2	0.4784	0.4785	0.4581	0.472	0.4685	0.4751
k=3	0.432	0.4285	0.4239	0.4533	0.4571	0.4423

k=4	0.4117	0.4077	0.4002	0.4134	0.4139	0.436
k=5	0.4248	0.4059	0.3908	0.405	0.398	0.4148
k=6	0.411	0.4114	0.3956	0.3956	0.4147	0.4211
k=7	0.4186	0.3923	0.3899	0.4013	0.397	0.4215
k=8	0.428	0.4037	0.3785	0.3822	0.4154	0.4145
k=9	0.4188	0.3997	0.3665	0.3918	0.4021	0.4296
k=10	0.4304	0.3981	0.3793	0.4006	0.386	0.4135
k=11	0.4278	0.4086	0.3912	0.3778	0.4029	0.4069
k=12	0.4432	0.4191	0.3871	0.3774	0.4052	0.4165
k=13	0.4557	0.418	0.3946	0.3815	0.3945	0.4116
k=14	0.4596	0.4122	0.3963	0.3839	0.401	0.4164
k=15	0.4612	0.4152	0.3835	0.379	0.3816	0.4026
k=16	0.4781	0.4301	0.3858	0.3937	0.4151	0.4021
k=17	0.4802	0.4357	0.3976	0.3916	0.4005	0.4259
k=18	0.4955	0.4401	0.3955	0.3736	0.3832	0.4101
k=19	0.5091	0.4434	0.4091	0.3999	0.3942	0.3972
k=20	0.5115	0.4499	0.4002	0.389	0.3907	0.4011
k=21	0.5236	0.4608	0.4088	0.3836	0.3861	0.392
k=22	0.5249	0.4729	0.4127	0.4093	0.3936	0.4046
k=23	0.542	0.4679	0.4131	0.3875	0.4055	0.4079
k=24	0.5614	0.4842	0.4151	0.3974	0.3888	0.4031
k=25	0.5671	0.4875	0.4202	0.4002	0.3973	0.4124
k=26	0.5784	0.4954	0.4173	0.3977	0.4022	0.4203
k=27	0.5813	0.5052	0.4297	0.3946	0.3867	0.4018
k=28	0.5903	0.507	0.4275	0.3921	0.3869	0.4189
k=29	0.6061	0.5093	0.4306	0.4013	0.4019	0.4
k=30	0.6148	0.5161	0.4452	0.3973	0.3973	0.3967
k=31	0.6224	0.5322	0.441	0.3986	0.4019	0.4086
k=32	0.639	0.5386	0.4372	0.3976	0.4035	0.3974
k=33	0.6453	0.533	0.44	0.4065	0.3861	0.4197
k=34	0.6508	0.5381	0.4418	0.4077	0.3979	0.3915
k=35	0.6629	0.5534	0.4514	0.3999	0.3738	0.4135
k=36	0.677	0.5614	0.4353	0.4036	0.405	0.4015
k=37	0.6775	0.555	0.4578	0.3981	0.3972	0.394
k=38	0.6957	0.5709	0.4649	0.4145	0.4148	0.4208
k=39	0.7078	0.5768	0.4555	0.3998	0.3819	0.3899
k=40	0.7224	0.58	0.459	0.4191	0.3959	0.4086
k=41	0.7321	0.5901	0.4635	0.3991	0.3835	0.4043
k=42	0.7428	0.5823	0.4602	0.4073	0.3876	0.412
k=43	0.7627	0.5957	0.4658	0.4184	0.4021	0.4206
k=44	0.7742	0.6104	0.4776	0.4122	0.3935	0.4179
k=45	0.7907	0.6129	0.4709	0.4071	0.3926	0.4125
k=46	0.8077	0.6264	0.479	0.424	0.402	0.3972
k=47	0.8158	0.6344	0.4866	0.4067	0.4101	0.3984
k=48	0.8322	0.6454	0.4798	0.4114	0.4041	0.4137
k=49	0.8503	0.6527	0.4823	0.4049	0.4175	0.4179
k=50	0.8584	0.6579	0.5019	0.4109	0.3967	0.3873
k=51	0.8745	0.6685	0.485	0.4064	0.4098	0.4154
k=52	0.8983	0.6797	0.4996	0.4184	0.4017	0.3904
k=53	0.9059	0.684	0.5057	0.4248	0.4016	0.4222
k=54	0.926	0.6963	0.5021	0.4188	0.3895	0.3961
k=55	0.9412	0.6989	0.5101	0.4271	0.3964	0.421
k=56	0.956	0.7159	0.5086	0.4255	0.3978	0.3948
k=57	0.9771	0.7241	0.5161	0.4196	0.4098	0.3995
k=58	0.9952	0.7324	0.5139	0.4082	0.4039	0.394

k=59	1.0089	0.7428	0.5109	0.412	0.4089	0.4041
k=60	1.0264	0.7567	0.5121	0.4018	0.3978	0.4052
k=61	1.0428	0.7718	0.5228	0.4314	0.399	0.3957
k=62	1.0574	0.77	0.5338	0.4234	0.3912	0.4157
k=63	1.0751	0.7825	0.5294	0.4307	0.3994	0.4187
k=64	1.093	0.7961	0.5405	0.4131	0.4041	0.4033
k=65	1.1085	0.8061	0.5339	0.4215	0.4126	0.3994
k=66	1.1233	0.8159	0.5516	0.4207	0.3966	0.4086
k=67	1.143	0.8217	0.5544	0.4337	0.3952	0.4227
k=68	1.1565	0.8359	0.5553	0.4265	0.3967	0.4235
k=69	1.1731	0.8407	0.5431	0.4314	0.3913	0.4034
k=70	1.1834	0.8537	0.5528	0.4404	0.406	0.4065
k=71	1.1998	0.8617	0.5695	0.4408	0.3984	0.412
k=72	1.215	0.8796	0.5667	0.4394	0.3875	0.3951
k=73	1.227	0.8879	0.5722	0.4291	0.4114	0.4278
k=74	1.2404	0.8916	0.5686	0.4184	0.4077	0.4309
k=75	1.2548	0.8981	0.5727	0.4312	0.3909	0.4182
k=76	1.2694	0.9193	0.5947	0.4299	0.4019	0.41
k=77	1.2796	0.9202	0.5783	0.4302	0.3983	0.4201
k=78	1.2933	0.9288	0.5873	0.4507	0.4214	0.3994
k=79	1.3078	0.9372	0.5814	0.431	0.4011	0.4054
k=80	1.3216	0.9467	0.5784	0.4358	0.4006	0.4021
k=81	1.3328	0.948	0.5878	0.4334	0.4092	0.3969
k=82	1.3459	0.9673	0.5998	0.4225	0.4007	0.402
k=83	1.3557	0.9733	0.6041	0.4397	0.3956	0.4159
k=84	1.3697	0.9865	0.6049	0.4309	0.4144	0.4008
k=85	1.3802	0.9907	0.6154	0.4541	0.408	0.4099
k=86	1.3906	0.9991	0.6112	0.4415	0.3964	0.4143
k=87	1.4027	1.0115	0.6123	0.4536	0.3899	0.3981
k=88	1.4119	1.0159	0.6312	0.4299	0.4088	0.4255
k=89	1.4235	1.0144	0.617	0.4413	0.4013	0.4055
k=90	1.434	1.0286	0.6253	0.4484	0.4075	0.4037
k=91	1.4451	1.0351	0.6367	0.4514	0.4188	0.3968
k=92	1.4535	1.0504	0.6286	0.445	0.398	0.4134
k=93	1.4628	1.0506	0.6375	0.4578	0.4062	0.4205
k=94	1.473	1.0555	0.6408	0.4598	0.392	0.4125
k=95	1.4829	1.0669	0.6296	0.4487	0.3949	0.4202
k=96	1.4931	1.0652	0.6385	0.435	0.4017	0.397
k=97	1.4992	1.0794	0.6349	0.4631	0.4074	0.4081
k=98	1.5102	1.0829	0.6356	0.4441	0.4084	0.4062
k=99	1.5211	1.093	0.6624	0.4435	0.3946	0.3989
k=100	1.5306	1.1023	0.6453	0.4599	0.4164	0.4265
k=101	1.5412	1.1045	0.6514	0.4451	0.4205	0.4188
k=102	1.5476	1.107	0.6529	0.4509	0.3981	0.4288
k=103	1.5576	1.1252	0.6638	0.4513	0.4098	0.4116
k=104	1.5676	1.1215	0.6521	0.4532	0.3996	0.4118
k=105	1.577	1.1345	0.669	0.4569	0.415	0.4056
k=106	1.5873	1.1442	0.6645	0.4586	0.4042	0.4201
k=107	1.5988	1.1432	0.6854	0.4425	0.4197	0.418
k=108	1.6071	1.1534	0.6561	0.4554	0.4061	0.3957
k=109	1.6204	1.1614	0.6762	0.4563	0.4076	0.4045
k=110	1.6297	1.1677	0.666	0.4491	0.4043	0.4157
k=111	1.6398	1.1729	0.6742	0.459	0.4011	0.3985
k=112	1.6478	1.1813	0.6903	0.4668	0.4032	0.4102
k=113	1.6568	1.1921	0.6822	0.4643	0.4222	0.4184

k=114	1.6671	1.1935	0.6812	0.4658	0.4257	0.414
k=115	1.677	1.1982	0.6915	0.4663	0.3978	0.3902
k=116	1.69	1.2022	0.6959	0.4619	0.4139	0.4156
k=117	1.6977	1.2218	0.7009	0.4519	0.3992	0.4121
k=118	1.7073	1.2271	0.6744	0.4684	0.4219	0.4217
k=119	1.7192	1.2262	0.7002	0.4636	0.4081	0.4025
k=120	1.7277	1.2289	0.7049	0.4644	0.4114	0.3967
k=121	1.7376	1.2424	0.7064	0.4818	0.4045	0.394
k=122	1.7471	1.2496	0.7205	0.4597	0.4088	0.4318
k=123	1.7582	1.2553	0.7059	0.4583	0.4309	0.3986
k=124	1.7697	1.2677	0.7138	0.4514	0.4015	0.4025
k=125	1.7796	1.2664	0.7233	0.4695	0.4107	0.414
k=126	1.789	1.2813	0.7235	0.4669	0.4235	0.4052
k=127	1.8002	1.2783	0.7186	0.4596	0.4066	0.4141
k=128	1.8114	1.2917	0.7285	0.4521	0.4066	0.3975
k=129	1.8242	1.2948	0.7362	0.4586	0.4124	0.406
k=130	1.8343	1.2979	0.7336	0.4823	0.403	0.4152
k=131	1.848	1.3077	0.7184	0.4832	0.4071	0.4121
k=132	1.8575	1.3189	0.7325	0.4668	0.4055	0.4062
k=133	1.8698	1.3181	0.747	0.4625	0.3885	0.4059
k=134	1.8853	1.3222	0.7437	0.4661	0.4143	0.4141
k=135	1.8955	1.3431	0.7333	0.4589	0.4253	0.407
k=136	1.9056	1.3413	0.7465	0.4787	0.4184	0.4143
k=137	1.9196	1.3431	0.7485	0.4613	0.4153	0.4052
k=138	1.9316	1.3554	0.765	0.4724	0.4071	0.4006
k=139	1.9434	1.367	0.7682	0.4832	0.4033	0.4005
k=140	1.9551	1.3725	0.7567	0.4709	0.4095	0.4183
k=141	1.9648	1.3741	0.7481	0.4714	0.4114	0.4139
k=142	1.979	1.3909	0.7616	0.4644	0.4393	0.4264
k=143	1.9905	1.3859	0.7571	0.4819	0.4079	0.4207
k=144	2.0045	1.3861	0.7612	0.4813	0.4166	0.4074
k=145	2.0184	1.4033	0.7661	0.4762	0.4106	0.4064
k=146	2.0329	1.4136	0.758	0.487	0.3963	0.4199
k=147	2.0446	1.4212	0.7642	0.4652	0.4064	0.4207
k=148	2.06	1.4279	0.774	0.4752	0.3986	0.3992
k=149	2.0747	1.4361	0.7781	0.4768	0.4262	0.406
k=150	2.0898	1.4424	0.7658	0.4843	0.4086	0.3965
k=151	2.1042	1.4487	0.7815	0.4754	0.4254	0.4229
k=152	2.1167	1.4514	0.7822	0.4726	0.4019	0.3996
k=153	2.1325	1.4595	0.7954	0.4707	0.4002	0.3955
k=154	2.1472	1.4714	0.7702	0.4739	0.4023	0.4256
k=155	2.1609	1.4735	0.7836	0.4805	0.4148	0.411
k=156	2.1749	1.4833	0.7875	0.4746	0.4155	0.4183
k=157	2.1872	1.489	0.7877	0.476	0.4249	0.4181
k=158	2.2034	1.4967	0.7841	0.4753	0.409	0.4173
k=159	2.2185	1.5048	0.7746	0.4642	0.4114	0.426
k=160	2.2323	1.5161	0.7963	0.4797	0.3938	0.4259
k=161	2.2491	1.5154	0.8089	0.4745	0.4182	0.4263
k=162	2.2677	1.5309	0.8085	0.4672	0.4035	0.405
k=163	2.2846	1.5299	0.7963	0.473	0.4014	0.4025
k=164	2.2993	1.5357	0.8033	0.4909	0.3974	0.4194
k=165	2.3173	1.5524	0.8054	0.4773	0.408	0.4144
k=166	2.3325	1.5481	0.807	0.4819	0.41	0.4049
k=167	2.3483	1.562	0.81	0.4755	0.415	0.4087
k=168	2.3609	1.5688	0.8078	0.4865	0.4209	0.4059

k=169	2.3744	1.5785	0.8239	0.4749	0.3936	0.402
k=170	2.3894	1.588	0.8172	0.4911	0.4023	0.4105
k=171	2.4054	1.5923	0.8256	0.4825	0.4158	0.4153
k=172	2.4218	1.601	0.8343	0.4799	0.4253	0.4318
k=173	2.4382	1.6094	0.8273	0.4864	0.4079	0.4076
k=174	2.4556	1.6122	0.8137	0.4757	0.3989	0.4074
k=175	2.473	1.6228	0.829	0.497	0.4013	0.4166
k=176	2.4906	1.635	0.8405	0.4891	0.4126	0.4115
k=177	2.506	1.6354	0.8402	0.4769	0.408	0.4061
k=178	2.5196	1.6411	0.8367	0.4924	0.4207	0.4113
k=179	2.5337	1.6482	0.8277	0.4631	0.4115	0.4016
k=180	2.548	1.6577	0.8376	0.4834	0.3927	0.3996
k=181	2.5613	1.6673	0.8481	0.4966	0.4166	0.4068
k=182	2.5738	1.6674	0.8162	0.4927	0.4156	0.4225
k=183	2.5885	1.68	0.8559	0.4886	0.4113	0.42
k=184	2.6031	1.6867	0.8548	0.4795	0.4069	0.4088
k=185	2.6154	1.6883	0.8424	0.4887	0.4273	0.3901
k=186	2.6292	1.6965	0.8558	0.4849	0.4241	0.4227
k=187	2.6433	1.6989	0.843	0.4693	0.4211	0.4099
Min	0.411	0.3923	0.3665	0.3736	0.3738	0.3873
Max	2.6433	1.6989	0.8559	0.5863	0.5838	0.5669

Annexe F: Base de Données des RSSI du 1er Essai (Siège SMA)

	Coordonnées (x,y) des références (m)		**L1 (0,75 0,75)**	**L2 (4,25 0,75)**	**L3 (4,75 6,15)**	**L4 (0,75 6,15)**
Référence N°	**x**	**y**	**RSSI L1 dBm**	**RSSI L2 dBm**	**RSSI L3 dBm**	**RSSI L4 dBm**
1	0	0	-47.9	-59.1	-67.7	-52.0
2	0.5	0	-43.0	-54.0	-64.6	-63.1
3	1	0	-42.8	-61.1	-65.9	-55.0
4	1.5	0	-48.0	-63.5	-62.9	-58.9
5	2	0	-53.6	-46.2	-69.9	-59.7
6	2.5	0	-52.2	-45.0	-63.0	-63.5
7	3	0	-54.9	-48.0	-63.6	-56.0
8	3.5	0	-68.4	-39.0	-63.0	-69.1
9	4	0	-67.3	-39.0	-63.2	-61.1
10	4.5	0	-67.6	-33.8	-60.5	-64.9
11	4.9	0	-64.5	-45.0	-72.2	-70.1
12	0	0.5	-43.9	-54.0	-69.4	-51.8
13	0.5	0.5	-40.0	-55.9	-75.8	-54.8
14	1	0.5	-38.0	-58.1	-70.0	-57.8
15	1.5	0.5	-43.0	-56.5	-60.2	-71.8
16	2	0.5	-50.0	-53.7	-64.3	-55.0
17	2.5	0.5	-51.4	-45.0	-67.6	-59.4
18	3	0.5	-55.2	-40.0	-61.1	-65.4
19	3.5	0.5	-58.1	-36.0	-61.4	-58.9
20	4	0.5	-59.6	-28.0	-65.3	-56.0
21	4.5	0.5	-65.2	-28.0	-58.2	-56.1
22	4.9	0.5	-60.2	-34.0	-62.0	-64.2
23	0	1	-43.0	-68.5	-68.2	-55.9
24	0.5	1	-37.2	-51.9	-61.1	-54.9

25	1	1	-35.9	-54.0	-66.7	-71.3
26	1.5	1	-43.0	-59.4	-60.8	-75.5
27	2	1	-48.7	-53.5	-66.1	-61.6
28	2.5	1	-51.0	-47.0	-65.0	-54.6
29	3	1	-60.1	-44.0	-72.2	-64.2
30	3.5	1	-61.1	-37.0	-60.8	-55.0
31	4	1	-60.9	-25.0	-66.7	-70.0
32	4.5	1	-79.7	-24.0	-64.6	-65.2
33	4.9	1	-72.0	-36.4	-56.3	-64.7
34	0	1.5	-49.0	-57.5	-59.7	-55.0
35	0.5	1.5	-42.0	-61.2	-56.7	-57.8
36	1	1.5	-45.0	-76.2	-66.1	-60.8
37	1.5	1.5	-48.0	-52.1	-59.4	-54.5
38	2	1.5	-51.7	-50.4	-61.7	-57.5
39	2.5	1.5	-59.7	-57.1	-70.2	-55.5
40	3	1.5	-59.2	-44.1	-76.4	-65.1
41	3.5	1.5	-70.1	-37.0	-66.5	-69.5
42	4	1.5	-63.8	-32.0	-68.1	-56.6
43	4.5	1.5	-67.2	-34.2	-63.5	-64.2
44	4.9	1.5	-64.0	-43.0	-74.3	-57.2
45	0	2	-60.7	-54.0	-63.7	-53.7
46	0.5	2	-49.2	-54.1	-66.6	-58.3
47	1	2	-55.2	-59.2	-61.7	-54.8
48	1.5	2	-55.0	-54.2	-61.2	-57.7
49	2	2	-55.3	-52.1	-74.5	-57.0
50	2.5	2	-58.3	-45.0	-55.0	-53.0
51	3	2	-61.8	-47.3	-52.1	-51.0
52	3.5	2	-57.0	-43.0	-71.2	-65.8
53	4	2	-59.0	-41.0	-73.2	-63.4
54	4.5	2	-64.5	-42.4	-56.8	-57.0
55	4.9	2	-61.0	-39.0	-63.4	-72.0
56	0	2.5	-54.0	-59.3	-62.1	-55.5
57	0.5	2.5	-52.8	-55.6	-63.9	-53.5
58	1	2.5	-55.0	-53.0	-59.5	-53.6
59	1.5	2.5	-60.0	-56.2	-64.1	-59.3
60	2	2.5	-55.0	-48.9	-68.8	-57.8
61	2.5	2.5	-65.3	-51.0	-71.6	-56.0
62	3	2.5	-64.0	-46.3	-60.8	-57.0
63	3.5	2.5	-64.1	-42.1	-60.0	-61.8
64	4	2.5	-77.0	-41.0	-54.0	-64.0
65	4.5	2.5	-71.6	-51.0	-57.2	-61.9
66	4.9	2.5	-67.6	-47.1	-57.2	-70.8
67	0	3	-54.0	-59.0	-77.4	-67.4
68	0.5	3	-56.5	-57.3	-78.0	-52.3
69	1	3	-85.1	-51.0	-60.9	-53.5
70	1.5	3	-60.0	-54.0	-61.3	-56.3
71	2	3	-63.1	-55.2	-60.7	-64.8
72	2.5	3	-61.9	-53.8	-69.9	-56.3
73	3	3	-68.2	-53.9	-64.3	-61.3
74	3.5	3	-60.7	-46.0	-62.2	-64.2
75	4	3	-80.5	-45.0	-56.3	-70.7
76	4.5	3	-76.6	-46.0	-56.7	-60.4
77	4.9	3	-78.5	-47.9	-60.1	-58.8
78	0	3.5	-59.0	-59.6	-65.0	-51.3
79	0.5	3.5	-57.8	-62.4	-61.7	-52.3

80	1	3.5	-65.5	-58.0	-71.5	-54.1
81	1.5	3.5	-59.4	-56.8	-54.5	-49.0
82	2	3.5	-58.4	-55.0	-75.4	-48.6
83	2.5	3.5	-61.3	-59.4	-62.6	-59.5
84	3.5	3.5	-66.1	-47.5	-53.5	-54.9
85	4	3.5	-65.9	-61.4	-49.1	-67.3
86	4.5	3.5	-75.5	-55.0	-50.9	-58.9
87	4.9	3.5	-74.0	-52.0	-50.6	-68.5
88	0	3.9	-58.2	-66.0	-63.4	-51.3
89	0.5	3.9	-60.6	-49.9	-60.8	-46.2
90	1	3.9	-62.0	-62.6	-65.6	-48.8
91	1.5	3.9	-66.8	-57.9	-61.9	-53.8
92	2	3.9	-65.5	-51.0	-61.7	-57.1
93	2.5	3.9	-65.8	-70.8	-56.6	-56.3
94	3	3.9	-74.7	-54.5	-54.9	-65.6
95	3.5	3.9	-68.5	-71.0	-59.8	-58.5
96	4	3.9	-70.0	-52.0	-49.6	-63.9
97	4.5	3.9	-74.7	-55.0	-49.2	-61.0
98	5	3.9	-69.7	-59.6	-49.1	-55.0
99	5.5	3.9	-76.7	-70.0	-50.2	-62.2
100	0	4.4	-62.3	-61.0	-59.5	-47.8
101	0.5	4.4	-72.9	-57.3	-66.5	-43.5
102	1	4.4	-84.4	-61.5	-55.9	-45.0
103	1.5	4.4	-63.1	-61.8	-55.3	-49.0
104	2	4.4	-85.7	-61.0	-61.2	-50.2
105	2.5	4.4	-66.6	-69.3	-50.9	-57.3
106	3	4.4	-64.4	-53.1	-58.6	-62.9
107	3.5	4.4	-69.4	-49.7	-55.8	-59.8
108	4	4.4	-75.1	-54.0	-43.5	-55.0
109	4.5	4.4	-70.3	-64.2	-45.0	-61.0
110	5	4.4	-72.7	-55.0	-56.3	-60.7
111	5.5	4.4	-63.9	-62.5	-49.9	-58.1
112	0	4.9	-64.9	-55.0	-71.1	-47.9
113	0.5	4.9	-72.0	-65.3	-81.4	-42.2
114	1	4.9	-61.0	-62.2	-55.1	-39.9
115	1.5	4.9	-68.7	-63.8	-58.6	-45.8
116	2	4.9	-66.5	-61.2	-55.6	-55.1
117	2.5	4.9	-71.1	-61.0	-53.1	-52.5
118	3	4.9	-65.8	-55.0	-56.0	-51.0
119	3.5	4.9	-71.7	-59.1	-51.0	-50.8
120	4	4.9	-69.4	-56.0	-45.0	-55.6
121	4.5	4.9	-73.4	-53.0	-42.0	-52.2
122	5	4.9	-74.7	-57.9	-43.1	-76.6
123	5.5	4.9	-87.3	-62.9	-50.5	-55.5
124	0	5.4	-65.3	-56.4	-52.9	-42.3
125	0.5	5.4	-72.0	-57.1	-60.4	-38.5
126	1	5.4	-69.0	-57.4	-53.8	-37.0
127	1.5	5.4	-64.5	-71.0	-53.4	-45.8
128	2	5.4	-72.8	-57.1	-54.7	-49.0
129	2.5	5.4	-62.0	-56.7	-52.0	-55.0
130	3	5.4	-68.9	-56.7	-47.1	-57.7
131	3.5	5.4	-70.6	-54.0	-45.0	-52.7
132	4	5.4	-74.8	-53.2	-41.2	-50.5
133	4.5	5.4	-68.2	-56.3	-37.0	-57.0
134	5	5.4	-71.8	-76.0	-37.0	-58.5

135	5.5	5.4	-76.3	-64.7	-39.2	-55.0
136	0	5.9	-70.6	-63.2	-57.6	-33.3
137	0.5	5.9	-71.4	-59.6	-62.3	-27.0
138	1	5.9	-67.5	-66.2	-67.2	-28.0
139	1.5	5.9	-72.3	-63.0	-56.1	-39.0
140	2	5.9	-68.0	-64.1	-50.8	-47.9
141	2.5	5.9	-61.5	-56.8	-45.8	-53.0
142	3	5.9	-63.8	-64.6	-43.0	-55.9
143	3.5	5.9	-71.1	-60.4	-42.8	-55.3
144	4	5.9	-74.8	-60.0	-35.6	-56.2
145	4.5	5.9	-72.1	-64.2	-29.0	-67.6
146	5	5.9	-69.4	-61.0	-29.0	-57.2
147	5.5	5.9	-70.4	-57.4	-37.0	-66.5
148	0	6.4	-69.7	-60.8	-64.7	-33.0
149	0.5	6.4	-66.2	-58.4	-57.9	-25.0
150	1	6.4	-69.0	-69.9	-58.1	-27.0
151	1.5	6.4	-82.6	-64.3	-54.8	-37.0
152	2	6.4	-68.4	-63.2	-63.7	-45.0
153	2.5	6.4	-64.3	-60.8	-45.0	-47.9
154	3	6.4	-78.6	-66.3	-49.3	-50.1
155	3.5	6.4	-72.5	-66.7	-41.0	-70.6
156	4	6.4	-66.2	-58.5	-39.7	-57.9
157	4.5	6.4	-69.5	-58.1	-25.0	-67.0
158	5	6.4	-67.7	-59.3	-24.0	-57.8
159	5.5	6.4	-74.7	-55.5	-37.0	-61.1
160	0	6.8	-78.5	-62.0	-57.6	-43.0
161	0.5	6.8	-70.3	-63.0	-57.4	-33.0
162	1	6.8	-71.7	-52.0	-56.8	-34.0
163	1.5	6.8	-69.0	-63.8	-54.2	-37.0
164	2	6.8	-69.3	-61.0	-53.5	-42.4
165	2.5	6.8	-66.5	-64.9	-47.9	-48.0
166	3	6.8	-65.8	-75.8	-42.1	-49.0
167	3.5	6.8	-79.6	-67.8	-39.0	-57.7
168	4	6.8	-58.3	-53.1	-37.0	-55.4
169	4.5	6.8	-60.5	-64.9	-37.7	-62.3
170	5	6.8	-60.8	-57.3	-34.2	-71.5
171	5.5	6.8	-77.7	-60.9	-37.0	-73.1

Annexe G: Les valeurs RSSI des nœuds cibles 1er essai (Siège SMA)

	Coordonnées (x,y) des nœuds cibles		**L1 (0,75 0,75)m**	**L2 (4,25 0,75)m**	**L3 (4,75 6,15)m**	**L4 (0,75 6,15)m**
Cible N°	**x**	**y**	**RSSI L 1 dBm**	**RSSI L2 dBm**	**RSSI L3 dBm**	**RSSI L4 dBm**
1	0	0	-46.9	-55.0	-68.2	-51.0
2	0.75	0.25	-37.0	-68.2	-63.9	-62.6
3	1.9	0.4	-48.4	-54.8	-67.8	-55.1
4	2.3	0	-52.0	-44.2	-65.6	-65.5
5	2.9	0.1	-60.1	-45.5	-64.8	-62.8
6	3.6	0	-63.2	-44.8	-61.5	-61.6
7	4.9	0	-66.8	-47.4	-71.5	-75.0
8	4.3	0.7	-62.9	-15.0	-64.7	-55.0

9	3.4	0.8	-58.3	-37.0	-54.6	-65.1
10	0	0.75	-45.0	-68.8	-67.3	-55.5
11	1	1	-37.3	-54.9	-63.8	-68.1
12	2.1	1.2	-53.1	-57.2	-67.3	-55.0
13	3.9	1.4	-59.4	-32.0	-57.8	-65.0
14	4.8	1.2	-80.3	-33.0	-65.2	-60.7
15	4.9	1.8	-61.2	-39.0	-61.3	-60.0
16	2.7	1.7	-57.1	-48.0	-73.1	-51.9
17	0.9	1.9	-53.0	-71.6	-57.8	-66.4
18	0	2.25	-55.0	-54.7	-66.3	-62.8
19	0.8	2.4	-56.9	-59.0	-56.5	-51.7
20	1.75	2	-50.9	-55.5	-73.3	-60.5
21	2.8	2.2	-66.2	-51.3	-61.8	-55.4
22	3	2	-64.9	-47.0	-50.1	-49.5
23	3.8	2	-66.0	-41.9	-62.0	-74.7
24	4	2.75	-64.7	-45.0	-52.9	-53.6
25	2.75	2.75	-61.1	-48.6	-76.6	-55.5
26	1.6	2.6	-59.5	-55.7	-52.9	-51.5
27	0.7	3.3	-61.5	-55.6	-58.4	-47.0
28	2.2	3.25	-60.9	-59.1	-58.5	-53.9
29	2.6	3.4	-62.8	-65.6	-57.5	-67.7
30	3.3	3.1	-65.5	-56.2	-53.6	-62.4
31	3.7	3.4	-64.1	-47.1	-54.2	-54.0
32	4.9	3.25	-72.7	-57.3	-49.7	-56.2
33	4	3.5	-65.7	-61.0	-50.8	-65.6
34	3.25	3.6	-62.8	-64.4	-54.6	-58.8
35	1.25	4.15	-63.6	-55.7	-74.0	-47.7
36	2	3.9	-64.2	-51.1	-62.5	-56.9
37	2.7	4.2	-69.3	-60.9	-56.1	-54.2
38	3.6	4.2	-69.7	-51.0	-53.0	-63.9
39	5.25	4	-65.8	-63.2	-47.0	-60.2
40	5.5	3.9	-74.6	-76.8	-48.5	-73.9
41	5.5	4.15	-78.8	-54.4	-55.0	-56.3
42	5.2	4.7	-69.9	-63.9	-45.0	-63.2
43	1.75	4.4	-63.9	-53.4	-56.3	-49.9
44	0	4.65	-63.1	-56.8	-57.8	-44.8
45	1	4.9	-64.3	-61.0	-54.4	-43.8
46	1	5.15	-66.5	-57.3	-58.0	-39.9
47	2.6	5	-78.3	-57.2	-48.6	-58.3
48	3.4	5.3	-71.7	-57.1	-45.7	-53.1
49	4.5	4.9	-79.0	-51.8	-42.0	-53.0
50	5.25	5	-73.3	-53.6	-43.0	-64.2
51	5.25	5.4	-85.6	-76.7	-43.2	-53.5
52	5.5	5.65	-75.4	-61.0	-40.0	-56.7
53	4.25	5.65	-71.0	-58.4	-37.0	-58.9
54	2.6	5.8	-72.6	-63.7	-54.2	-53.5
55	0.75	5.65	-69.6	-71.5	-55.0	-29.0
56	0	6.15	-61.0	-59.8	-59.5	-37.0
57	0.9	6.3	-73.0	-63.4	-54.0	-22.0
58	1.4	6	-66.6	-60.9	-52.2	-37.0
59	1.9	6.3	-67.2	-61.0	-55.0	-44.6
60	3.25	6.1	-84.0	-62.3	-48.9	-58.8

61	4.9	6	-67.6	-60.5	-24.0	-55.4
62	5.4	6.15	-78.2	-61.7	-36.0	-56.2
63	5.25	6.4	-72.2	-66.1	-39.0	-67.9
64	5.5	6.8	-72.6	-58.3	-38.4	-63.0
65	5.25	6.8	-71.4	-56.8	-35.0	-53.0
66	4.3	6.4	-66.7	-63.6	-31.0	-68.0
67	3.25	6.8	-62.2	-64.7	-41.0	-55.6
68	1.3	6.8	-73.7	-61.3	-55.4	-40.0
69	0	6.8	-71.9	-61.4	-57.0	-39.0
70	0	3.5	-56.5	-57.4	-64.3	-51.5

Annexe H: Base de Données des RSSI du 2ème Essai (Magasin Pôle Universitaire)

	Coordonnées (x,y) des références		**L1 (0,5 0,5)m**	**L2 (4,5 0,5)m**	**L3 (0,5 0,75)m**	**L4 (7,5 7,5)m**
Référence N°	**x**	**y**	**RSSI L1 dBm**	**RSSI L2 dBm**	**RSSI L3 dBm**	**RSSI L4 dBm**
1	0	0	-37.0	-72.5	-74.3	-69.6
2	1	0	-36.2	-65.3	-54.7	-66.6
3	2	0	-48.5	-60.1	-64.2	-64.8
4	3	0	-54.5	-49.5	-82.0	-64.1
5	4	0	-54.1	-42.4	-67.6	-68.5
6	5	0	-74.9	-41.1	-80.5	-69.2
7	0	1	-38.8	-78.4	-65.8	-65.5
8	1	1	-33.4	-63.6	-59.8	-64.8
9	2	1	-43.7	-63.8	-65.7	-70.4
10	3	1	-49.5	-53.4	-63.1	-61.4
11	4	1	-56.1	-40.7	-63.1	-60.7
12	5	1	-60.4	-38.0	-68.7	-70.3
13	0	2	-47.2	-71.9	-56.3	-62.1
14	1	2	-43.9	-71.2	-55.5	-68.4
15	2	2	-49.0	-65.7	-64.3	-75.5
16	3	2	-55.3	-55.0	-62.7	-75.2
17	4	2	-56.0	-50.8	-63.9	-69.7
18	5	2	-61.1	-51.0	-74.6	-65.9
19	0	3	-50.2	-63.9	-56.4	-63.0
20	1	3	-53.6	-88.4	-57.9	-65.5
21	2	3	-54.8	-67.4	-66.3	-74.4
22	3	3	-54.4	-55.7	-66.4	-64.2
23	4	3	-66.2	-55.7	-65.6	-71.9
24	5	3	-74.5	-55.4	-56.8	-67.5
25	0	4	-65.5	-70.0	-56.9	-61.7
26	1	4	-56.7	-71.0	-56.0	-64.3
27	2	4	-56.2	-68.5	-58.2	-63.6
28	3	4	-64.6	-64.1	-55.5	-64.1
29	4	4	-73.9	-65.9	-62.4	-54.9
30	5	4	-72.1	-68.5	-82.6	-67.7
31	0	5	-61.2	-77.4	-51.5	-58.0
32	1	5	-60.5	-66.4	-54.5	-68.7
33	2	5	-58.9	-69.2	-51.8	-57.0

34	3	5	-57.8	-66.8	-54.8	-54.0
35	4	5	-57.1	-65.9	-62.7	-59.2
36	5	5	-59.9	-70.6	-64.0	-57.4
37	0	6	-69.2	-66.9	-50.2	-64.3
38	1	6	-59.6	-80.1	-46.8	-55.6
39	2	6	-64.1	-68.1	-54.3	-55.0
40	3	6	-66.9	-68.2	-60.1	-52.2
41	4	6	-62.9	-74.8	-59.2	-48.9
42	5	6	-59.8	-63.9	-55.0	-46.4
43	0	7	-70.2	-69.9	-33.8	-62.9
44	1	7	-63.3	-71.4	-34.5	-61.9
45	2	7	-67.2	-83.5	-46.0	-56.9
46	3	7	-57.8	-70.5	-53.7	-49.0
47	4	7	-64.3	-70.0	-65.9	-36.0
48	5	7	-60.9	-65.3	-67.8	-40.6
49	0	8	-68.4	-81.5	-37.0	-57.1
50	1	8	-75.2	-66.9	-37.0	-63.2
51	2	8	-67.4	-71.7	-48.8	-54.4
52	3	8	-64.1	-77.0	-59.6	-47.1
53	4	8	-64.4	-67.0	-55.2	-35.8
54	5	8	-65.5	-74.3	-61.1	-38.0

Annexe I: Les valeurs RSSI des nœuds cibles 2ème essai (Magasin Pôle Universitaire)

	Coordonnées (x,y) des nœuds cible		L1 (0,5 0,5)m	L2 (4,5 0,5)m	L3 (0,5 0,75)m	L4 (7,5 7,5)m
Cible N°	**x**	**y**	**RSSI L1**	**RSSI L2**	**RSSI L3**	**RSSI L4**
1	0	0.5	-41.3	-80.2	-65.8	-67.9
2	1.5	0.5	-49.4	-63.1	-82.4	-69.3
3	2.3	0.3	-56.0	-59.5	-71.1	-68.9
4	3.5	0.7	-64.8	-48.0	-68.9	-72.0
5	4.6	0	-74.3	-43.0	-78.5	-73.3
6	0.5	2.5	-58.9	-68.9	-73.5	-64.1
7	1.8	1.8	-55.0	-65.9	-72.9	-80.2
8	2	3	-62.2	-66.7	-67.9	-75.6
9	3.1	2.2	-63.7	-59.9	-72.1	-67.5
10	4	2	-68.2	-53.0	-75.6	-82.5
11	5	2	-75.3	-53.7	-74.5	-71.0
12	0	4	-70.8	-70.1	-69.7	-74.6
13	1.3	4.2	-72.4	-65.2	-68.9	-74.0
14	2.5	4.5	-66.2	-69.0	-73.8	-65.1
15	3.5	3.5	-71.3	-75.7	-75.8	-69.1
16	3.5	5	-80.1	-69.0	-66.3	-64.2
17	4.5	3.2	-71.6	-61.2	-67.8	-67.0
18	4.6	4.4	-74.6	-70.1	-75.7	-66.1
19	0.9	5.8	-75.8	-86.8	-53.7	-69.5
20	1.5	6.5	-69.6	-81.1	-54.3	-61.9
21	2.5	7	-77.0	-70.9	-55.2	-55.1
22	2.7	6.2	-84.2	-72.0	-63.5	-68.3
23	4	6	-78.8	-72.3	-69.6	-53.5

24	4.7	5.7	-75.2	-71.3	-76.0	-53.6
25	5	7	-67.9	-66.2	-69.5	-43.8
26	0	8	-78.6	-74.0	-43.0	-71.4
27	0.8	7.2	-78.3	-79.7	-38.0	-66.4
28	1.5	8	-74.8	-71.4	-53.3	-64.0
29	3.5	7.5	-78.5	-68.8	-66.9	-44.8
30	4.3	7.9	-73.8	-71.2	-61.2	-35.0

Annexe J: Résultats du positionnement (1er essai) (distance euclidienne, k=8, p=4, base de données de 52 références)

N°	x réel	y réel	x estimé	y estimé	L'erreur(m)
1	0	0	0.19	0.09	0.21
2	0.75	0.25	0.42	0.80	0.64
3	1.9	0.4	0.78	0.40	1.12
4	2.3	0	2.70	0.62	0.74
5	2.9	0.1	4.00	1.31	1.64
6	3.6	0	3.00	1.69	1.79
7	4.9	0	4.71	0.24	0.31
8	4.3	0.7	3.98	0.93	0.40
9	3.4	0.8	4.18	1.26	0.91
10	0	0.75	0.01	1.00	0.25
11	1	1	1.01	0.99	0.02
12	2.1	1.2	0.82	1.15	1.28
13	3.9	1.4	4.26	1.07	0.49
14	4.8	1.2	4.33	1.40	0.51
15	4.9	1.8	3.83	0.45	1.73
16	2.7	1.7	1.94	1.70	0.76
17	0.9	1.9	0.90	2.12	0.22
18	0	2.25	1.83	1.27	2.08
19	0.8	2.4	1.13	2.83	0.54
20	1.75	2	1.63	1.52	0.50
21	2.8	2.2	2.00	3.88	1.87
22	3	2	3.00	2.13	0.13
23	3.8	2	4.74	1.76	0.97
24	4	2.75	2.98	2.14	1.19
25	2.75	2.75	2.08	1.89	1.09
26	1.6	2.6	2.55	3.90	1.61
27	0.7	3.3	2.07	4.18	1.63
28	2.2	3.25	1.37	3.46	0.85
29	2.6	3.4	2.66	3.48	0.10
30	3.3	3.1	3.08	3.82	0.76
31	3.7	3.4	2.94	2.24	1.39
32	4.9	3.25	4.65	4.13	0.91
33	4	3.5	3.47	4.18	0.86
34	3.25	3.6	2.19	4.67	1.51
35	1.25	4.15	0.02	4.86	1.42
36	2	3.9	1.99	3.88	**0.02**
37	2.7	4.2	2.12	4.88	0.90
38	3.6	4.2	3.90	3.89	0.43
39	5.25	4	3.60	5.16	2.02
40	5.5	3.9	5.17	4.62	0.79
41	5.5	4.15	3.65	3.59	1.94

42	5.2	4.7	4.31	4.90	0.91
43	1.75	4.4	2.96	4.82	1.28
44	0	4.65	1.97	4.88	1.98
45	1	4.9	1.63	5.77	1.07
46	1	5.15	1.41	6.05	0.99
47	2.6	5	4.28	4.37	1.79
48	3.4	5.3	4.16	4.72	0.96
49	4.5	4.9	4.30	5.02	0.23
50	5.25	5	4.51	4.84	0.75
51	5.25	5.4	4.45	5.05	0.87
52	5.5	5.65	4.07	5.77	1.44
53	4.25	5.65	4.27	5.79	0.14
54	2.6	5.8	3.01	4.91	0.98
55	0.75	5.65	0.49	5.96	0.41
56	0	6.15	1.03	5.10	1.47
57	0.9	6.3	0.55	6.05	0.43
58	1.4	6	1.34	6.08	0.10
59	1.9	6.3	1.98	6.61	0.32
60	3.25	6.1	5.41	4.83	**2.50**
61	4.9	6	4.95	5.91	0.10
62	5.4	6.15	4.03	5.89	1.40
63	5.25	6.4	5.20	6.00	0.40
64	5.5	6.8	5.28	5.85	0.97
65	5.25	6.8	4.15	5.82	1.47
66	4.3	6.4	5.08	6.23	0.80
67	3.25	6.8	3.01	5.90	0.94
68	1.3	6.8	1.15	6.62	0.23
69	0	6.8	1.08	6.42	1.14
70	0	3.5	0.72	2.16	1.52

Annexe K: Résultats du positionnement (2ème essai) (distance euclidienne, k=7, p=3)

Cible N°	x réel	y réel	x estimé	y estimé	l'erreur
1	0	0.5	0.11	1.04	0.55
2	1.5	0.5	2.31	1.20	1.07
3	2.3	0.3	3.24	2.22	2.13
4	3.5	0.7	4.23	2.09	1.57
5	4.6	0	4.95	0.14	0.38
6	0.5	2.5	3.22	3.94	3.07
7	1.8	1.8	2.21	2.72	1.01
8	2	3	2.33	3.09	0.34
9	3.1	2.2	4.06	2.50	1.01
10	4	2	4.38	2.18	0.42
11	5	2	4.71	2.05	**0.29**
12	0	4	3.24	3.47	**3.29**
13	1.3	4.2	3.61	3.28	2.49
14	2.5	4.5	3.51	4.03	1.11
15	3.5	3.5	4.24	3.61	0.75
16	3.5	5	3.13	4.26	0.83
17	4.5	3.2	3.85	3.57	0.75
18	4.6	4.4	4.55	3.99	0.42
19	0.9	5.8	1.28	4.79	1.08

20	1.5	6.5	0.67	5.95	1.00
21	2.5	7	2.48	5.49	1.51
22	2.7	6.2	3.01	4.30	1.93
23	4	6	3.57	5.38	0.76
24	4.7	5.7	3.87	4.97	1.11
25	5	7	4.49	6.75	0.57
26	0	8	0.77	7.33	1.02
27	0.8	7.2	0.61	7.47	0.33
28	1.5	8	1.04	5.33	2.71
29	3.5	7.5	4.01	6.17	1.43
30	4.3	7.9	4.29	7.29	0.61