

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE A.MIRA-BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Télécommunications
Spécialité : Système des Télécommunications

Présenté par

MELLAOUI Mohamed
OUARAB Tamazight

Thème

*Localisation d'un Mobile par réseaux de capteurs
sans fil.*

Soutenu le 21 juin 2018

Devant le Jury

Président	M. TOUNSLM
Examineur	Mme. IDJEDARENE.S
Encadreur	M. BERRAH.S
Co-encadreur	M. OUAMRI.M.A

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

Nous remercions "Dieu" le tout puissant, de nous avoir accordé le courage, la patience et la volonté pour mener à terme ce travail.

Nous adressons nos reconnaissance et nos remerciement à nos encadreur M^r M.A OUAMRI et M^r S.BERRAH de nous avoir honoré par leurs encadrement, pour leurs "disponibilité", leurs orientation et leurs précieux conseils qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous remercions les membres du jury, M^r M.TOUNSI et M^{me} S.Idjedarene d'avoir accepté de juger notre travail.

Nous tenons à remercier M^{lle} S.ZENADJI de nous avoir aidé dans ce mémoire.

Nos remerciement vont aussi à nos familles et amis qui nous ont prodigué conseils et encouragements.

Dédicaces

Je dédie ce Modeste travail

A ma très chère maman en signe d'amour, de reconnaissance et de gratitude pour tous le soutien, les prières et sacrifices dont elle a fait preuve à mon égard.

A mes très chères sœurs Tîleli et Nina.

A mes très chers frères Massi et Aris.

A mon petit neveu : Amir

A mes amis qui m'ont toujours soutenus et étaient à mes cotés.

Tamazight.

Dédicaces

Je dédie ce Modeste travail :

A ma très chère maman en signe d'amour, de reconnaissance et de gratitude pour tous les soutiens et sacrifices dont elle a fait preuve à mon égard.

A mon père qui m'a toujours soutenu et encouragé.

A mes mon cher frère Mouloud.

A mes très chères sœurs Rima, Naïma, Kenza, Fouzia.

*A mes nièces et neveux : Zineb, Abderherman, Yasmine, Yacine,
Adam, Mariya, Nélya.*

A mes amis qui m'ont toujours soutenus et étaient à mes cotés.

Mohamed.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	
Dédicaces	
Table des matières.....	I
Liste des figures.....	V
Liste des abréviations.....	VII
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES RCSF	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Présentation des réseaux de capteur.....	3
I.2.1 Définition d'un capteur.....	3
I.2.2 Définition d'un réseau de capteurs sans fils.....	4
I.3 Architecture d'un nœud capteur.....	5
I.3.1 Architecture matérielle.....	5
I.3.2 Architecture logicielle.....	6
I.4 Technologies radio des réseaux de capteurs.....	6
I.4.1 Bluetooth/ La norme IEEE 802.15.1.....	6
I.4.2 Zigbee/ La norme IEEE 802.15.4.....	7
I.4.3 UWB (Ultra Wide Band)/ La norme IEEE 802.15.3.....	7
I.4.4 Infrarouge.....	7
I.5 Types de capteurs sans fil.....	8
I.6 Type des réseaux de capteurs sans fil.....	8
I.6.1 RCSF Terrestre.....	8
I.6.2 RCSF Souterrain.....	9
I.6.3 RCSF Aquatique.....	9
I.6.4 RCSF Multimédias.....	10

TABLE DES MATIERES

I.6.5 RCSF Mobile	10
I.7 Couverture dans les réseaux de capteurs	11
I.8 Domaines d'applications d'un réseau de capteurs	12
I.8.1 Applications militaires	12
I.8.2 Applications environnementales.....	13
I.8.3 Applications dans le domaine médical.....	13
I.8.4 Applications liées à la sécurité.....	14
I.8.5 Applications commerciales	14
I.9 Caractéristiques et contraintes d'un RCSF	14
I.10 Redondance dans un réseau de capteurs	16
I.11 Conclusion	17
CHAPITRE II : TECHNIQUES DE LOCALISATION ET ROUTAGE	
II.1 Introduction	18
II.2 Objectif de la localisation	18
II.3 Critères de localisation	18
II.4 Processus de localisation	19
II.4.1 Estimation de distance	19
II.4.1.1 Mesures basées (Range based)	20
II.4.1.1.1 Temps d'arrivée (TOA).....	20
II.4.1.1.2 Différence Du Temps D'arrivé (TDOA).....	22
II.4.1.1.3 Force du signal RSSI.....	24
II.4.1.1.4. Angle d'arrivée	26
II.4.1.2. Mesures libres (range free)	27
II.4.1.2.1 DV-Hop (Distance Vector hop localisation)	27
II.4.1.2.2 APIT	29

TABLE DES MATIERES

II.4.1.2.3 Méthode Centroïde.....	30
II.4.1.3 Comparaison entre le Range Based et le Range Free	30
II.4.2 Calcul de positionnement	30
II.4.2.1. Trilatération	31
II.4.2.2 Triangulation	32
II.4.2.3 Multilateration	34
II.5 le routage	35
II.5.1 Types de routage.....	35
II.5.1.1 Routage plat :.....	35
II.5.1.2 Routage hiérarchique.....	36
II.5.1.3 Routage basé sur la position des nœuds.....	37
II.5.2 Métrique de routage.....	37
II.5.2.1 Types de métriques.....	38
II.5.2.2 Informations liées à l'implémentation de la métrique	39
II.6 Conclusion	40
CHAPITRE III : ETUDE DU FILTRE DE KALMAN	
III.1 Introduction	41
III.2 Etude du filtre de Kalman (Kf).....	41
III.2.1 Estimateur	41
III.2.2 Propriété d'un estimateur	41
III.2.3 Estimateur optimal	42
III.3 Modélisation du filtre de Kalman.....	42
III.4 Déroulement du Filtrage de Kalman	43
III.4.1 Etape d'initialisation	44
III.4.2 Etape de Prédiction	44

TABLE DES MATIERES

III.4.3 Etape de mise à jour (correction)	45
III.5 Les limites de filtre de Kalman	46
III.6 Filtre de Kalman étendu EKF	47
I.7 Conclusion	48
CHAPITRE IV : APPLICATION DES TECHNIQUES DE LOCALISATION	
IV.1 Introduction	49
IV.2 Localisation par la technique AOA	49
IV.3 Localisation par technique de Trilatération	51
IV.4 Localisation par Multilatération	54
IV.5 Localisation basé sur le calcul RSSI	55
IV.6 Localisation DV-hop	57
IV.7 Localisation par filtre de KALMAN étendu (EKF)	60
IV.7.1 Implémentation	60
IV.7.2 Simulation et discussion des résultats:	62
IV.8 Comparaison entre les Techniques de Localisation	63
IV.8.1 Discussion des résultats	64
IV.9 Le simulateur CupCarbon	64
IV.9.1 Présentation générale du cupcarbon	64
IV.9.2 Simulation	65
IV.10 Conclusion	67
Conclusion générale	68

Bibliographie

Résumé

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Exemple d'un capteur.	3
Figure I.2 : Architecture générale d'un RCSF.	4
Figure I.3 : Composantes d'un capteur.	5
Figure I.4 : RCSF Terrestre.	9
Figure I.5 : RCSF Aquatique.	10
Figure I.6 : RCSF Mobile.	11
Figure I.7 : Zone de couverture d'un capteur.	11
Figure I.8 : Réseau de capteurs militaire.	12

Chapitre II

Figure II.1 : Processus de localisation.	19
Figure II.2 : Technique TOA en mode non-synchronisé.	21
Figure II.3 : Schéma explicatif de la méthode TDOA.	22
Figure II.4 : Illustration du principe TDOA.	24
Figure II.5 : Schéma explicatif de la méthode RSSI.	25
Figure II.6 : La technique DV-Hop.	28
Figure II.7 : Le principe de la technique APIT.	29
Figure II.8 : Schéma démonstratif de la Trilateration.	31
Figure II.9 : Schéma démonstratif de la Tringulation.	33
Figure II.10 : Schéma démonstratif de la Multilateration.	35
Figure II.11 : Schéma explicatif du Routage Plat.	36
Figure II.12 : Schéma explicatif du Routage Hiérarchique.	37

Chapitre 3

Figure III.1 : Les étapes du filtre de Kalman.	42
--	----

Liste des figures

Chapitre IV

Figure IV.1 : Direction de l'angle en utilisant la méthode d'estimation spectrale entropique	50
Figure IV.2 : Direction de l'angle en utilisant la méthode de spectre de prédiction linéaire .	50
Figure IV.3 : Estimation de la position en utilisant la Trilatération	51
Figure IV.4 : Estimation de l'erreur de localisation par la méthode de trilatération	52
Figure IV.5 : Estimation de la position du mobile.....	53
Figure IV.6 : Variation de l'erreur de localisation.....	53
Figure IV.7 : Localisation par Multilatération	54
Figure IV.8 : Variation de l'erreur moyenne en fonction du nombre de mobile	55
Figure IV.9 : Localisation par technique RSSI.....	56
Figure IV.10 : Erreur de localisation par la méthode RSSI	56
Figure IV.11 : Topologie du réseau	57
Figure IV.12 : Variation de l'erreur pour chaque nœud	58
Figure IV.13 : Topologie du réseau selon la 2ème répartition pour DV-Hop.....	59
Figure IV.14 : Variation de l'erreur pour chaque nœud selon la 2ème répartition pour la méthode DV-Hop	59
Figure IV.15 : Localisation par le filtre de Kalman étendu (EKF).....	62
Figure IV.16 : Distances réelles et distances calculés par la méthode (EKF)	63
Figure IV.17 : Topologie du réseau sous CupCarbon.....	65
Figure IV.18 : Détection de mobile par le 1er capteur.....	65
Figure IV.19 : Détection du mobile par les 2 capteurs (zone de chevauchement)	66
Figure IV.20 : Détection du mobile par le 2ème capteur.....	67

Liste des acronymes

ADC : Analog Digital Converter.

AOA : Angle Of Arrival.

APIT : Approximate Point In Triangulation.

BTS : Base Transceiver Station.

CPU : Centre Processing Unit.

DV : Distance Vector.

EKF : Extended Kalman Filters.

GPS : Global Positioning System.

Kf : Kalman Filter.

QOS : Quality Of Service.

RCSF : Réseaux de Capteurs Sans Fil.

RF : Radio Frequency.

RSSI : Received Signal Strength Indicator.

TDOA : Time Difference Of Arrival.

TinyOS : Tiny Open Source.

TOA : Time Of Arrival.

UWB : Ultra Wide Band.

WSN : Wireless Sensor Network.

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

Les réseaux de capteurs sans fils RCSF ne cessent d'attirer l'attention du monde des télécommunications depuis au moins une décennie. Ils sont considérés comme une révolution qui va influencer notre manière de vivre; ils promettent plusieurs applications possibles, à titre d'exemples ; contrôler le trafic dans les rues, surveiller un environnement dans des régions dangereuses, suivre les patients dans les hôpitaux et surveiller les forces ennemies dans un champ de bataille. En effet, grâce aux progrès des technologies sans fils, les capteurs peuvent communiquer non seulement de proche en proche mais aussi d'acheminer de l'information à tous les nœuds connectés au réseau.

La localisation dans un réseau de capteurs sans fils nécessite la connaissance de positions de certains nœuds "ancres". Nous avons fait appel aux techniques de localisations utilisées dans les réseaux de capteurs sans fils. des informations échangées comme le temps d'arrivée du signal (TOA) ou la différence des temps d'arrivée (TDOA), l'angle d'arrivé du signal (AOA) et le DV-hop qui s'inspire des protocoles de routage à vecteur de distance. Ces techniques fournissent de bons résultats mais nécessitent une synchronisation précise. Les techniques citées sont basées sur des méthodes de géo-localisation telles que la triangulation pour (AOA), la Trilatération pour (TOA) et la Multilatération pour (TDOA), ainsi que la technique RSSI qui requiert la connaissance des puissances d'émission et de réception respectivement P_t et P_r pour déterminer la distance qui sépare le mobile du capteur. Les valeurs du RSSI d'un réseau de capteurs sont ainsi exploitées dans le filtre de Kalman dont le rôle est l'estimation de la position du mobile, les positions occupées par le mobile sont déduites en utilisant un filtre non linéaire tel que le filtre de Kalman étendu (EKF).

Ce mémoire traite la problématique de la localisation statique dans les réseaux de capteurs sans fil. Son but réside dans l'étude des différentes méthodes de localisation ainsi de comparer ces dernières les unes aux autres en terme d'erreur moyenne dans un milieu homogène sans interférences.

Une étude et analyse de performances à travers une simulation avec le logiciel MATLAB a été réalisée, notamment pour l'erreur d'estimation globale du réseau de capteurs sans fils, nous avons ainsi ajouté une application sous CupCarbon qui nous permettra de visualiser le mécanisme de détection et routage d'un mobile dans un état dynamique.

Notre travail est structuré comme suite :

Introduction Générale

Le premier chapitre expose une description générale des réseaux de capteurs sans fils ainsi que leurs caractéristiques, applications, contraintes et spécificités.

Le deuxième chapitre est divisé en deux parties, la première consiste à présenter et étudier les techniques de base de localisation. Dans la seconde partie, les différents types et métrique de routage utilisés sont décrites.

Le chapitre trois présente et explique le déroulement du filtre de Kalman ainsi que son déroulement.

Le quatrième et dernier chapitre porte sur l'évaluation des résultats de simulations des approches étudiées.

Le travail se clôture par une conclusion générale pour résumer les apports essentiels de notre travail, les ouvertures et les perspectives pour le futur.

CHAPITRE I

Généralités sur les RCSF

I.1 Introduction

Les progrès technologiques récents dans le domaine de la micro-électronique et de l'informatique ont permis le développement des dispositifs de plus en plus petits équipés de processeurs rapides et de composants de communication sans fil et mobiles, leur permettant de traiter des informations mais également de les transmettre. Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) entrent dans ce cadre. En effet, ceux-ci sont constitués d'un ensemble de petits appareils, ou capteurs, possédant des ressources particulièrement limitées, mais qui leur permettent néanmoins d'acquérir des données sur leur environnement immédiat, de les traiter et de les communiquer à une station de base ou au point de collecte.

Dans ce chapitre, nous allons donner un ensemble de définitions sur les réseaux de capteurs sans fil, leurs évolutions, leurs routages, leurs redondances, ainsi on verra leurs caractéristiques, et les domaines d'application, et on finira par les différents systèmes de surveillance utilisés.

I.2 Présentation des réseaux de capteur

I.2.1 Définition d'un capteur

Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une information manipulable, Il est caractérisé par :

- Rayon d'émission : environ 100m.
- Position : cordonné (x, y, z).
- Énergie : capacité de batterie.
- Bande de Fréquence : 550-560 Mhz.
- Cout d'émission.

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, etc.) et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base BTS. La figure (I.1) montre un exemple de nœud de capteur :



Figure I.1 : Exemple d'un capteur.

I.2.2 Définition d'un réseau de capteurs sans fils

Un réseau de capteurs est un modèle spécial de réseau où l'infrastructure de communication et l'administration centralisée sont absentes. Composé d'un grand nombre de nœuds capteurs dispersés dans une zone géographique appelée champs de captage. Les positions de ces nœuds n'ont pas besoin d'être prés déterminées, ce qui permet un déploiement aléatoire dans les terrains inaccessibles ou les opérations secours lors d'un désastre [1]. Ces nœuds de capteurs ont la capacité de collecter les données, les router vers le nœud puits dit Sink et enfin l'utilisation finale via une communication multi-sauts. le nœud puits est communiqué avec la station de base (BTS) qui lui sert de reliaer vers le monde extérieure par satellite ou internet pour permettre à l'utilisateur de traiter et rendre les informations captées utile, tout ce processus est illustré dans la figure I.2.

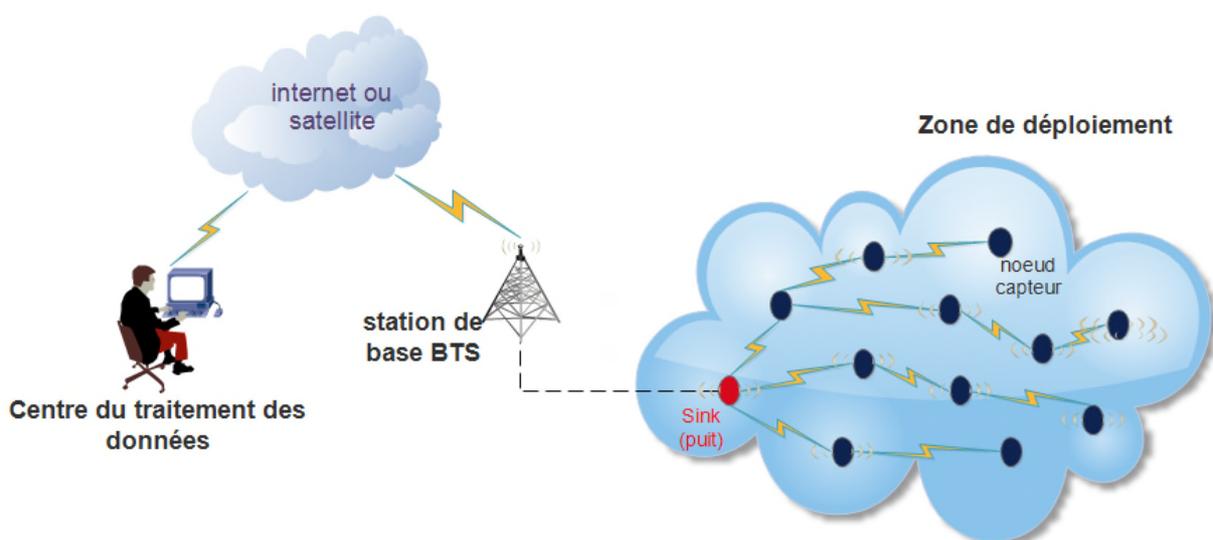


Figure I.2 : Architecture générale d'un RCSF.

I.3 Architecture d'un nœud capteur

I.3.1 Architecture matérielle

Un capteur est composé principalement d'une unité de captage, traitement, communication, stockage, et d'énergie. Suivant le domaine d'application, un capteur peut contenir également des éléments supplémentaires, tel qu'un système de localisation. Un nœud d'un réseau de capteur est formé des modules suivant [2] et qui sont illustrés dans la figure suivante :

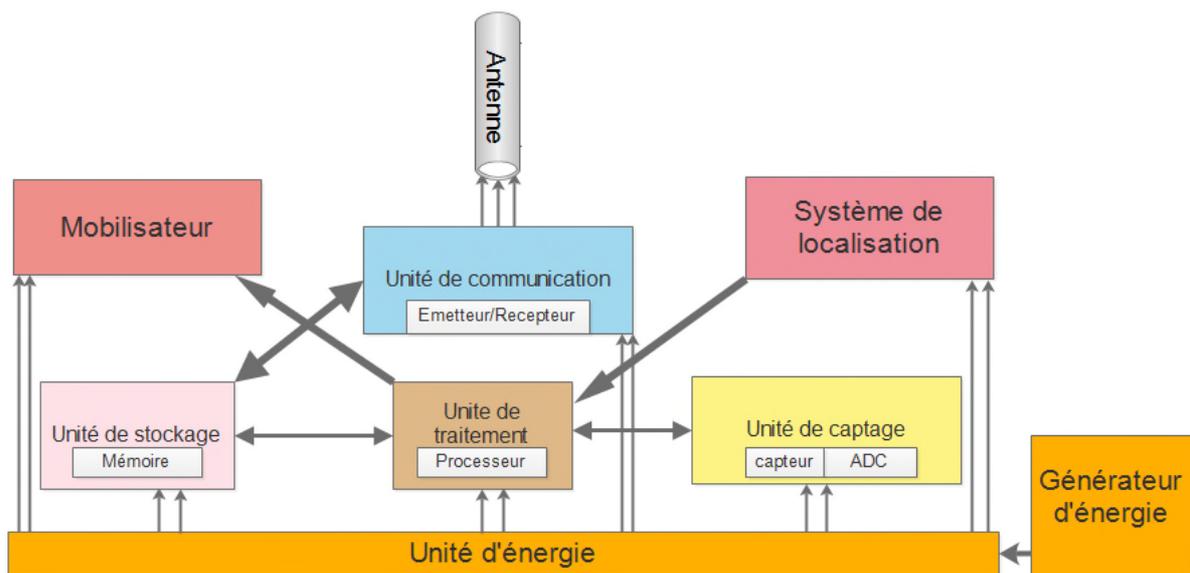


Figure I.3 : Composantes d'un capteur.

On peut voir sur la figure I.3 les différents composants qui constituent un capteur. Pour être plus précis chaque groupe de composants possède son propre rôle :

- Unité de captage (sensing unit)

Cette unité est composée d'un capteur qui va obtenir des mesures physique (Pression, Humidité, température...) et les traduire en un signal analogique basé sur le phénomène observé, et d'un convertisseur Analogique/Numérique qui permet de convertir le signal produit par le capteur en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

- Unité de traitement (MicroController unit)

Composée d'un processeur(CPU) et d'une mémoire (unité de stockage) intégrant un système d'exploitation spécifique TinyOS, qui permet de prendre en charge l'exécution des protocoles de communications pour la gestion de la collaboration entre les nœuds du réseau

CHAPITRE I : Généralités sur les RCSF

suivant la tâche demandée. Et aussi d'effectuer des traitements sur les données captées par le capteur lui-même ou par d'autre capteur.

- Unité de communication (Transceiver unit)

Cette unité est responsable de toutes les émissions et réception via un support de communication sans fil à faible portée [3]. Elle se base sur les différents moyens de transmission comme la Radiofréquence (RF), le laser et infrarouge.

- Unité d'énergie (Power unit)

C'est la partie qui alimente la globalité des autres unités en terme d'énergie électrique, constituée généralement d'une batterie de courte durée et impossible à recharger, néanmoins pour des déploiements en zones sensible, une batterie autonome est intégrée au capteur pour permettre d'alimenter en transformant l'énergie solaire en énergie électrique.

I.3.2 Architecture logicielle

Les dernières avancées dans le domaine de la microélectronique et informatique, ont permis de faire embarquer un système d'exploitation au sein d'un capteur afin d'améliorer plus le caractère intelligent des capteurs et faciliter leurs configurations à distance.

Le système d'exploitation le plus utilisé pour les réseaux de capteurs est le TinyOS, c'est un système open source conçu spécifiquement pour ce dernier. Il se base sur une programmation événementielle, c'est-à-dire que l'exécution des instructions s'effectue en fonction des événements enregistrés par l'unité de traitement. Les capteurs sont laissés au repos (mode veille) dans le cas où il n'y a pas d'événement.

I.4 Technologies radio des réseaux de capteurs

Parmi les technologies radio utilisées pour permettre les communications entre capteurs sans fil, nous pouvons citer : Bluetooth (IEEE802.15.1), UWB (ou IEEE 802.15.3) et Zigbee (IEEE 802.15.4)...etc.

I.4.1 Bluetooth/ La norme IEEE 802.15.1

Initialement, la norme Bluetooth a été proposée pour transmettre la voix et les données. Elle avait pour objectif préalable de permettre des communications sur de courtes distances avec un débit de communication limitée. Ses caractéristiques ont ainsi retenu l'attention des développeurs de capteurs. Par exemple les capteurs BtNode sont conçus pour

CHAPITRE I : Généralités sur les RCSF

une communication de type Bluetooth. Pour autant, le protocole Bluetooth n'est pas le protocole le plus utilisé dans les réseaux de capteurs, bien qu'il puisse répondre en partie aux problèmes de préservation de l'énergie, car il est gravement handicapé par la taille limitée du réseau qu'il peut former (8 nœuds, 1 maître et 7 esclaves).

I.4.2 Zigbee/ La norme IEEE 802.15.4

Elle est conçue pour être utilisée dans les communications à très faible puissance et sur des distances réduites. Cette technologie est utilisée dans les réseaux de capteurs sans fil [4]. Par rapport à Bluetooth, cette technologie fournit une faible latence, permet aux nœuds de basculer en mode sommeil sans perdre la synchronisation. Le protocole Zigbee est basé sur le standard déploiement de réseau dense à plus de 65000 nœuds avec une portée de l'ordre de 100 mètres pour un débit de 250 Kbits/s. Ces caractéristiques ont fait aujourd'hui le principal protocole utilisé dans les réseaux de capteurs.

I.4.3 UWB (Ultra Wide Band)/ La norme IEEE 802.15.3

Cette norme utilise des signaux radio envoyés avec une intensité très faible et des impulsions très courtes [4]. Elle opère dans la bande de fréquence de 3,1GHz à 10,6 GHz. UWB est conçue pour remplacer la norme Bluetooth afin d'offrir plus de bande passante, moins d'interférences avec les autres technologies et un délai plus court. UWB est utilisée pour les transmissions à haut débit avec une consommation électrique (proche de 400 mW). Cette technologie offre des avantages par rapport à Bluetooth. Elle consomme 50 fois moins d'énergie pour transmettre un bit par rapport à Bluetooth. Cette norme est devenue la candidate la plus intéressante pour fournir la qualité de service dans les réseaux WSN (Wireless Sensor Networks). L'inconvénient majeur de la technologie UWB est sa faible portée de communication (environ 10 m).

I.4.4 Infrarouge

Les ondes infrarouges sont utilisées pour la communication à courte distance, ainsi elles s'adaptent au mode de communication entre les nœuds d'un réseau de capteur. Les ondes infrarouges sont préférées aux ondes radio, car elles n'interfèrent pas avec les autres signaux électromagnétiques. Les émetteurs-récepteurs utilisant la technologie infrarouge ne sont pas chers, et ils sont faciles à fabriquer. Les composants matériels utilisant ce type de communication sont généralement conformes aux standards publiés par l'Infrared Data Association(IrDA).

I.5 Types de capteurs sans fil

L'architecture des réseaux de capteurs sans fils utilise pas mal de sources. Un travail relatif a été effectué dans le contexte des réseaux à auto-organisation et mobiles .

- **Nœuds** : ce sont des capteurs, leur type, leur architecture et leur disposition géographique dépendent de l'utilité en question avec une énergie souvent limitée parce qu'ils sont alimentés par des piles.
- **Sink** : c'est un nœud particulier du réseau son rôle principal est la collecte des données issues des différents nœuds du réseau. L'arrivée des informations est aléatoire donc il doit être toujours actif. C'est pour cela que son énergie doit être illimitée. Dans un réseau de capteur sans fils plus ou moins large et à charge un peu élevée, on peut trouver deux sinks ou plus pour alléger la charge.
- **Station de base (BTS)** : c'est le bloc vers lequel les données rassemblées par le sink sont envoyées. Son rôle est de regrouper les informations issues des nœuds et les traiter de façon à en extraire de l'information utile exploitable. Ce dernier peut être éloigné du sink [5], alors les données doivent être transférées à travers un autre réseau, c'est pourquoi on insère une passerelle entre le sink et le réseau de transfert pour adapter le type de données au type du canal.

I.6 Type des réseaux de capteurs sans fil

Les RCSF sont déployé par tout. Sur terrain, sous l'eau et sous terre. Ils affrontent plusieurs challenges et contraintes qui dépendent de leur environnement. Nous pouvons énumérer les cinq types de RCSF suivants [3] :

I.6.1 RCSF Terrestre

Un RCSF terrestre comporte un ensemble (centaines à milliers) de nœuds à faible cout qui sont déployés sur terrain dans une zone donnée (déployés à partir d'un hélicoptère par exemple). Dans un tel réseau, les nœuds de capteurs doivent transmettre des données à une SB dans un environnement intense. Les nœuds capteurs terrestre peuvent être équipés d'une source d'énergie secondaire telle que les cellules solaires car l'énergie de la batterie est limitée et la plus part du temps inaccessible. Les applications communes des RCSF terrestre sont la capture et le monitoring environnemental, industriel et les explorations des surfaces.

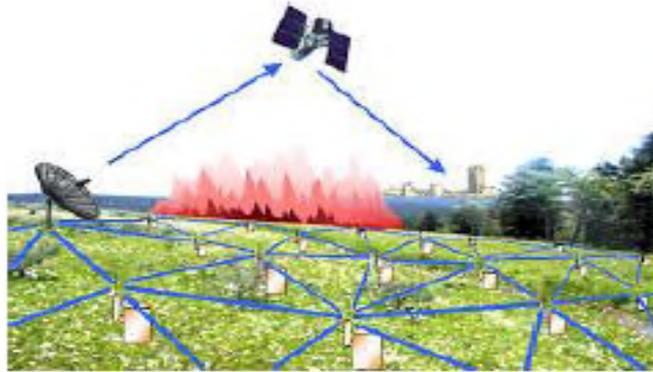


Figure I.4 : RCSF Terrestre.

I.6.2 RCSF Souterrain

RCSF souterrain consiste en un grand nombre de nœuds capteurs qui sont déployés sous terre, dans des chambres ou des mines pour examiner et contrôler les conditions souterraines. Des nœuds Sinks additionnels seront situés à la surface afin de pouvoir transmettre les données à partir des nœuds capteurs souterrains jusqu'à la SB. Ce type de capteurs nécessite des équipements appropriés pour assurer une communication fiable à travers la terre, les rochers et l'eau. Pour cela, ils sont plus coûteux que les RCSF terrestre. La communication sans fil est une épreuve dans telles conditions environnementales à cause de la perte du signal et la forte atténuation. En outre, il n'est presque pas possible de recharger ou de remplacer les batteries des capteurs sous terre, ce qui oblige l'utilisation de protocoles de communications à économie d'énergie pour proroger la durée de vie du réseau. Ils sont utilisés dans le monitoring agricole, le monitoring souterrain du sol et de l'eau et la surveillance des frontières militaires.

I.6.3 RCSF Aquatique

Un RCSF aquatique comporte un ensemble de nœuds qui sont déployés sous l'eau, dans un environnement océanique par exemple. Ce type de nœuds coute très cher, ce qui implique très peu de capteurs seront déployés, en revanche, des véhicules aquatiques seront utilisés pour explorer ou récupérer les données acquises. Les communications dans un tel environnement utilisent des ondes acoustiques (voir la figure I.5), qui présentent différents inconvénients comme une bande passante limitée, une haute latence, un délai de propagation plus long et des problèmes d'affaiblissement du signal. Ces nœuds sont caractérisés par l'auto-configuration et à l'adaptation aux conditions extrêmes de l'environnement océanique. Les capteurs aquatiques sont utilisés dans plusieurs applications tel le contrôle de la pollution,

CHAPITRE I : Généralités sur les RCSF

la prévention et le monitoring de désastre comme les séismes, la surveillance et l'exploration sous-marine.

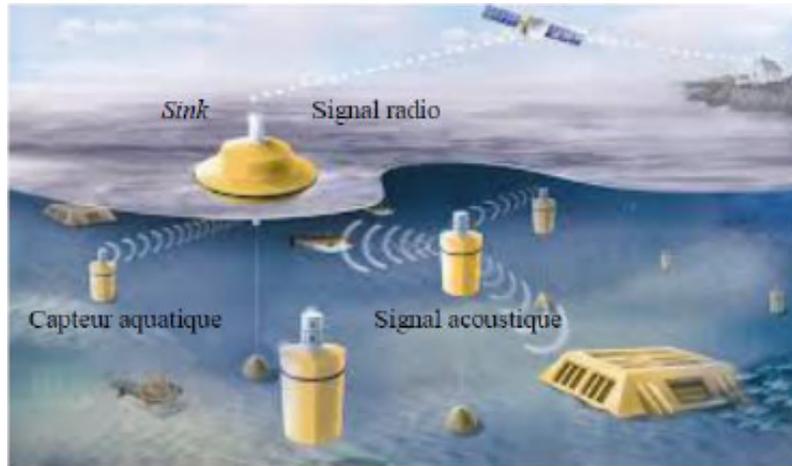


Figure I.5 : RCSF Aquatique.

I.6.4 RCSF Multimédias

Les RCSF multimédia se composent de nœuds capteurs à faible coût, déployés de manière aléatoire ou prédéterminés. Ils ont le pouvoir de stocker, traiter et de récupérer des données multimédias comme l'image, l'audio et la vidéo. Ce type de RCSF demande une forte consommation d'énergie et une bande passante très large. Il est donc nécessaire de développer des techniques de transmission qui doivent faire face à ces challenges pour la libération fiable du contenu tel qu'un streaming vidéo. Les réseaux de capteurs multimédias sans fils améliorent les applications des réseaux de capteurs sans fils existantes tel le suivi et la surveillance.

I.6.5 RCSF Mobile

Un RCSF mobil se comporte d'un ensemble de nœuds capteurs mobiles, qui ont le pouvoir de se déplacer et agir avec un milieu physique, les nœuds mobiles ont la capacité de capturer, traiter et communiquer de plus leurs pouvoirs de se repositionner et s'auto-organiser. Comme illustré dans la figure (I.6) les RCSF mobiles doivent affronter plusieurs défis comme le déploiement, la localisation avec mobilité, la gestion de la mobilité, la navigation et le contrôle des capteurs mobiles, la couverture et la minimisation de la consommation d'énergie. Ces réseaux sont appliqués dans la surveillance militaire, l'assistance aux opérations de secours, le suivi de cible et le monitoring environnementale.

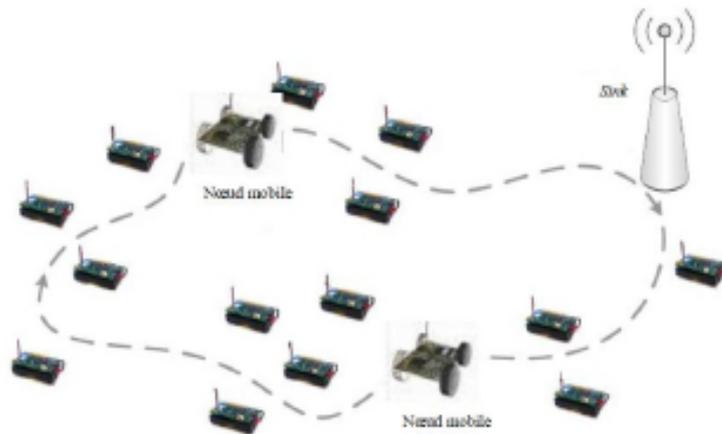


Figure I.6 : RCSF Mobile.

I.7 Couverture dans les réseaux de capteurs

Les capteurs fonctionnent avec un modèle à seuil. Un capteur possède deux zones : une zone de perception (captage) (SR) et une zone de communication (transmission) (CR). Pour schématiser, on considère que ces zones sont représentées par deux cercles et le capteur se trouve au centre de ces deux derniers comme le montre la figure I.7 :

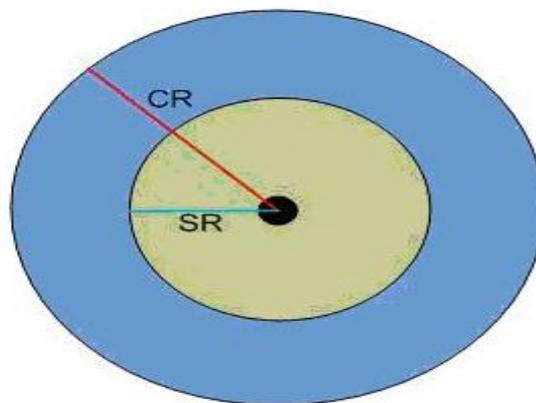


Figure I.7 : Zone de couverture d'un capteur.

En influant sur le rapport entre le rayon du SR et le rayon du CR, on va modifier les contraintes. Ainsi, on va pouvoir minimiser le nombre de nœuds actifs et maximiser la durée de vie du réseau. Comme les capteurs sont généralement disposés sur la zone à couvrir de façon aléatoire, il est nécessaire de disposer d'une densité importante de capteurs. Mais si la densité de capteurs est trop importante et que la zone que l'on veut surveiller est "trop" couverte, alors des capteurs vont fonctionner inutilement [6].

I.8 Domaines d'applications d'un réseau de capteurs

Les réseaux de capteurs peuvent se révéler très utiles dans divers domaines quand il s'agit de la collecte et du traitement des informations venant de l'extérieur. Grâce aux évolutions techniques dans le domaine de l'électronique et des télécommunications ce champ d'applications est de plus en plus élargi, parmi ces évolutions on peut citer la diminution du coût et de la taille des capteurs. On identifie les domaines où ces réseaux peuvent offrir les meilleures contributions :

I.8.1 Applications militaires

Les réseaux de capteurs autonomes sont envisagés comme l'élément essentiel dans cette lancée vers des systèmes de guerre centrés sur les réseaux comme l'illustre la figure (I.8), ils peuvent constituer des modules intégraux dans les systèmes militaires de commandes, contrôle, communication, calcul, intelligence, surveillance, reconnaissance et ciblage. L'auto-organisation et la tolérance aux pannes sont les caractéristiques principales de ce type de réseau. Ils peuvent être rapidement déployés et utilisés pour la surveillance des champs de bataille pour fournir des renseignements concernant l'emplacement, le nombre, le mouvement et l'identité des soldats et des véhicules ou bien encore pour la détection des agents chimiques, biologiques et nucléaires.

De plus, il existe d'autres applications militaires auxquelles les réseaux de capteurs peuvent être appliqués :

- Le contrôle des forces, équipement et munition
- Ciblage
- Estimation des dégâts
- Reconnaissance et surveillance du champ de bataille



Figure I.8 : Réseau de capteurs militaire.

I.8.2 Applications environnementales

Variables, sont les applications d'environnement qui peuvent bénéficier de la technologie des réseaux de capteurs sans fil, on peut énumérer par exemple, le cheminement des mouvement d'oiseaux, des petits animaux et des insectes ; le contrôle des aspects environnementaux qui peuvent affecter les récoltes et le bétail ; l'irrigation ; les macro-instruments utilisés pour la surveillances des terrains à grande échelle et les explorations planétaires ; la détection chimique et biologique ; la détection des incendies dans les forêts ; les travaux de recherche météorologiques et géophysiques ; la détection des inondations ; les études de pollution et la schématisation de la bio-complexité de l'environnement [7].

I.8.3 Applications dans le domaine médical

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce aux micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (détections de cancers, surveillance de la glycémie, etc.) [8]. Ils peuvent ainsi fournir des interfaces d'aide à des personnes handicapé et faciliter le diagnostic de quelques maladies en exécutant des mesures physiologiques comme : le battement du cœur, la tentions artérielle, etc. en utilisant des capteurs ayant chacun une mission bien particulière. Pour le suivi d'un patient. Il est possible de stocker les données physiologiques pour une longue durée. De plus, ces réseaux peuvent détecter des altitudes anormales (chute d'un lit, choc, cri, etc).

I.8.4 Applications liées à la sécurité

L'application des RCSF dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou un vieillissement de la structure [9].

I.8.5 Applications commerciales

Il est possible d'assimiler des capteurs au processus de stockage et livraison dans le domaine commercial. Parmi les quelle on peut citer : la construction des espace d'achats intelligents, le contrôle de qualité de produits ; la surveillance de l'état du matériel, la gestion inventaire, le contrôle des robots dans les environnements de fabrication automatique, les

jouets et musées interactifs, diagnostique des machines, le contrôle de l'automatisation des processus d'usinage ...etc [10].

I.9 Caractéristiques et contraintes d'un RCSF

Il existe plusieurs caractéristiques et contraintes dans les RCSF. Dont nous citons :

- La durée de vie limitée

Les nœuds capteurs sont équipés que d'une seule source d'énergie, de ce fait c'est l'une des contraintes les plus sensibles pour la conception. Mais aussi le cas du déploiement, généralement les capteurs sont déployés dans des zones très sensibles.

- Bande passante limitée

Etant donné que le réseau de capteur achemine des données qui ne dépassent pas quelque dizaine d'octet Kb/s, afin de minimiser l'énergie consommée lors du transfert des données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Ce qui fait que la puissance délivré par un nœud de capteur reste limitée.

- Topologie du réseau

Des centaines voire des milliers de nœuds peuvent être déployés dans un champ de captage. Il faut donc que les nœuds capteurs soient capables de maintenir et d'adapter à leur topologie.

On a généralement 3 phases pour la mise en place et l'évolution d'un réseau :

- Déploiement : Les nœuds sont soit répartis de manière prédéfini, soit de manière aléatoire. Ce dernier oblige le réseau de capteurs à s'auto-organiser sans l'aide extérieure.
- Post-déploiement-Exploitation : dans certains cas les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire rendant ainsi la topologie du réseau fréquemment changeante.
- Redéploiement : la plupart des applications (militaire) demandent l'ajout de nouveaux capteurs, ce qui implique la remise à jour de la topologie.

- La scalabilité (passage à l'échelle)

L'une des caractéristiques des RCSF est qu'ils peuvent contenir un nombre de nœuds qui est de l'ordre de plusieurs milliers de capteurs. Suivant l'application, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à des millions de capteurs. Un nombre aussi important de nœuds engendre

CHAPITRE I : Généralités sur les RCSF

beaucoup de transmission inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de beaucoup de mémoires pour stocker les informations reçues [11].

- La tolérance aux fautes

La tolérance aux fautes est la capacité d'un réseau pour maintenir son bon fonctionnement sans aucune interruption. Les interruptions sont causées par les pannes de nœuds. Dans un réseau de capteurs sans fil certains capteurs peuvent tomber en panne ou être bloqués du fait de l'épuisement de leurs batteries ou à cause d'un facteur environnemental. Les pannes des nœuds capteurs ne doivent pas affecter le bon fonctionnement du réseau [11].

- Ressource limité

En plus de l'énergie, les nœuds capteurs ont aussi une capacité de traitement et de mémoire limitée. En effet, les industriels veulent mettre en œuvre des capteurs simples, petits et peu coûteux.

- Agrégation de donnée

Les techniques d'agrégation de données, consiste à effectuer un traitement supplémentaire sur les données brutes captées depuis l'environnement. Un nœud agrégateur combine les données provenant de plusieurs nœuds et les fait compresser au maximum sans altérer l'information utile, ce qui réduit par conséquent la consommation d'énergie et augmente ainsi la durée de vie du réseau.

- coût de la production

L'intérêt de créer une nouvelle technologie est de faciliter la vie quotidienne des utilisateurs et de permettre de gagner du temps et de l'argent. Les réseaux de capteurs sont composés d'un grand nombre de nœuds capteurs. Par conséquent, le prix d'un capteur doit être réduit afin de concevoir un réseau de capteurs abordable [11].

- L'atténuation du signal

Elle peut être due à l'augmentation de la distance entre une source et une destination ou à la présence d'obstacles qui interrompent la ligne de propagation du signal, exemple : immeubles, mur,....

Par conséquent, le signal radio devient plus faible et la portée des signaux diminue.

- Les interférences

Une interférence se produit à chaque fois que deux nœuds, qui utilisent le même canal de transmission dans la même portée transmettent des données en même temps. C'est un des facteurs majeurs qui affecte considérablement les performances des RCSF en augmentant le taux de perte de paquets.

I.10 Redondance dans un réseau de capteurs

La redondance représente pour les réseaux de capteurs une caractéristique qui est à la fois rentable et pénalisante. Elle peut être utilisée pour améliorer la fiabilité de la détection, l'exactitude des données collectées ou encore augmenter la durée de vie du réseau. Par contre, elle engendre un transfert de données plus important qui entraîne un échange de trafic supplémentaire [12]. Nous présentons dans ce qui suit les différents types et propriétés de ce concept, afin d'expliquer le rôle important de la redondance dans l'élaboration d'un RCSF. La redondance peut être spatiale (duplication), temporelle (traitement multiple), ou d'information (code et signature) [13].

- La redondance spatiale (physique) : Signifie la possibilité d'obtenir l'information d'une position spécifique à partir de différentes sources et elle se base sur le positionnement géographique des nœuds de capteurs dans la zone d'intérêt. Ce type de redondance implique la réplique des ressources dans la surface de couverture du réseau.
- La redondance temporelle : Elle est utilisée pour augmenter la précision des données collectées par le capteur et à masquer les erreurs dans la détection ou la communication, en exécutant une action plus d'une fois dans le temps [13].
- La redondance d'information : Elle introduit une redondance dans la représentation de l'information, en ajoutant des données redondantes telles que les bits de parité qui permettent de détecter les erreurs ou bien des extras-bits qui permettent de reconstruire l'information perdue [13].

I.11 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette technologie suscite un intérêt croissant étant donné la diversité de ses applications : militaire, environnement, médical, commerciale. Et l'utilité des informations que le réseau de capteur peut collecter et acheminer, ce que rendent les réseaux de capteurs sans fil au cœur des recherches scientifiques.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons la localisation et le routage dans les réseaux de capteurs sans fil, nous expliqueront les différents types et méthodes de localisation, et nous présenterons les différents types de routage et les métriques utilisées dans le routage des réseaux de capteurs sans fil.

CHAPITRE II

Techniques de localisation et routage

II.1 introduction

La localisation est très importante pour trouver et déterminer l'emplacement d'un mobile à l'aide des méthodes de localisation. Notre chapitre est partagé en deux parties, dans la première partie on va le consacrer pour la localisation, nous parlerons de : l'objectif de la localisation, critères de localisation, et nous expliquerons le processus de localisation. Dans la deuxième partie on le réservera pour le routage, dont lequel nous aborderons : les différents types de routage et métriques utilisés dans les réseaux de capteurs sans fils et les informations liées à leurs implémentations.

II.2 Objectif de la localisation

La localisation d'un mobile est devenue ces dernières années une priorité pour l'évolution du mode de vie de l'être humain, et la continuité des progrès réalisés dans le domaine des télécommunications. Mais aussi parce que la localisation d'un mobile par les réseaux de capteurs à beaucoup d'avantages, comme localiser un mobile dans des zones sensibles et inaccessibles aux autres technologies de localisation avec une meilleure précision, et à faible coût. La localisation est importante pour plusieurs facteurs, parmi : l'identification et l'agrégation des données collectées.

II.3 Critères de localisation

Les méthodes de localisation sont évaluées selon une liste de critères dont nous citons [3] :

- Efficacité dans l'utilisation des ressources du RCSF : le RCSF doit utiliser les ressources du capteur d'une manière efficace.
- Contraintes énergétiques : dans les réseaux de capteurs, une gestion économique de l'énergie est indispensable, il faut trouver une méthode de localisation qui communique avec moins de consommation possible via la radio.
- Passage à l'échelle : une méthode de localisation peut être appliquée aussi bien à un RCSF dense qu'à un RCSF avec un nombre réduit de nœuds.
- L'erreur et la précision de localisation : l'erreur de la localisation est souvent définie comme étant, la distance euclidienne entre les vraies positions des nœuds et celles estimées par la méthode. L'objectif d'une méthode de localisation est de minimiser cette erreur pour augmenter la précision de localisation.

II.4 Processus de localisation

Le processus de localisation consiste à déterminer la position d'un mobile à travers un système spécifique, dans notre cas il s'agit des réseaux de capteurs sans fil. Selon les exigences de l'application, des méthodes appropriées peuvent être choisies, pour les applications nécessitant une meilleure précision, les méthodes de localisation sont réalisées dans deux étapes: mesure de distance et calcul de position, comme l'illustre la figure (II.1), le premier bloc estime la distance ou les angles d'arrivée à partir des informations du signal reçu et la deuxième étape traite la distance et l'information angulaire et estime la position grâce à plusieurs méthodes de positionnements.

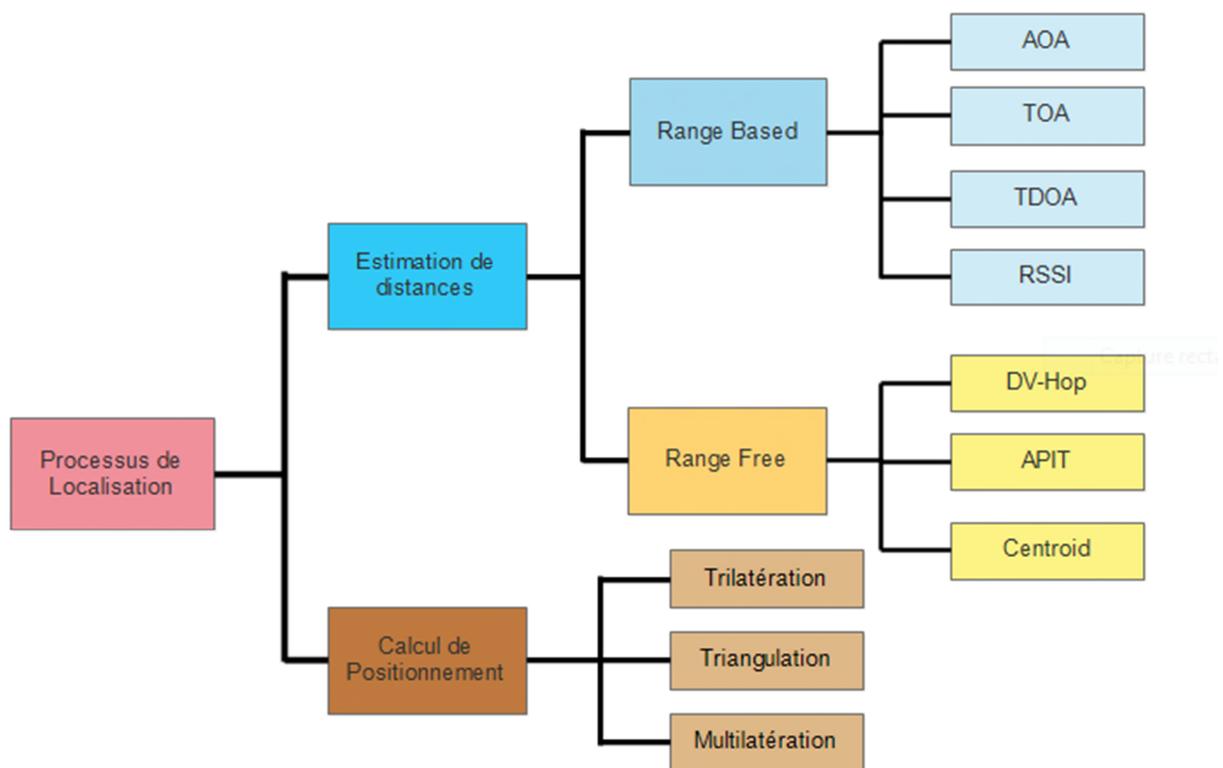


Figure II.1 : Processus de localisation.

II.4.1 Estimation de distance

Les algorithmes de localisation pour les réseaux de capteurs sans fil dépendent de différentes techniques de mesure, il ya beaucoup de facteurs qui influent sur la précision des algorithmes de localisation. Parmi ces facteurs clés : on a la densité des capteurs dans une zone, l'architecture du réseau, la forme géométrique de la zone de mesure, le nombre de capteurs, la synchronisation entre les horloges des capteurs et la largeur de la bande des

CHAPITRE II : Techniques de localisation et Routage

signaux de signalisation entre les capteurs. Cependant le type de mesure et de précision sont les facteurs fondamentaux qui influencent les algorithmes de localisation.

Les algorithmes de localisation des réseaux de capteurs sans fils peuvent être largement classés en deux types : mesures basées (range based) et mesures libres (range free), ces techniques sont discutées dans cette section.

II.4.1.1 Mesures basées (Range based)

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

II.4.1.1.1 Temps d'arrivée (TOA)

Les mesures de la technologie TOA (Time of Arrival) sont obtenues par l'utilisation de la relation simple qui existe entre le temps d'arrivée du signal et la distance. Soit d la distance entre le récepteur (capteur) et l'émetteur (mobile) et c la vitesse de propagation dans le milieu ($3 \cdot 10^8$ m/s), la différence de temps entre l'émission et la réception (le temps de propagation) est établie selon la formule suivante :

$$T_p = d/c \quad (\text{II.1})$$

Il existe deux classes de techniques : « l'aller simple » et « l'aller-retour ». La première catégorie exige une parfaite synchronisation 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 par l'équation :

$$d = (T_r - T_s) * c \quad (\text{II.2})$$

Où T_r est l'instant d'arrivée du signal et T_s est l'instant d'émission du signal.

Tandis que la seconde catégorie ne nécessite pas de synchronisation et le signal envoyé par le point de référence, est renvoyé par le mobile avec le temps qui a été utilisé pour traiter et retransmettre l'information.

CHAPITRE II : Techniques de localisation et Routage

La figure suivante illustre la technique TOA dans le cas où on n'a pas de synchronisation

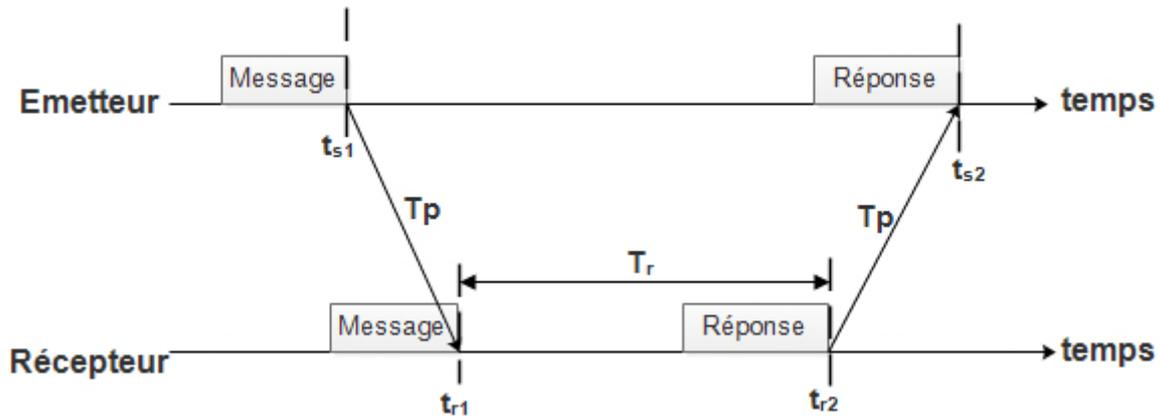


Figure II.2 : Technique TOA en mode non-synchronisé.

Avec :

t_{s1} : l'instant d'émission du signal ; t_{r1} : l'instant d'arrivée du signal ; t_{r2} : l'instant d'émission de la réponse ; t_{s2} : l'instant d'arrivée de la réponse ; T_r : temps du traitement ; T_p : temps de propagation.

A partir de la figure (II.2), on peut écrire :

$$T_{r1} = T_{s1} + T_p \quad (\text{II.3})$$

$$T_{r2} = T_{r1} + T_r \quad (\text{II.4})$$

Finalement,

$$T_{s2} = T_{r2} + T_p \quad (\text{II.5})$$

Après la soustraction T_{r2} de T_{r1} , on aura le résultat suivant :

$$T_{r2} - T_{r1} = 2T_p + T_r \quad (\text{II.6})$$

Le temps T_p peut être calculé comme suivant :

$$T_p = \frac{T_{s2} - T_{s1} - T_r}{2} \quad (\text{II.7})$$

Si on a le temps de propagation, et que la vitesse de propagation dans le milieu est connue, alors on peut déduire la distance par la formule suivante :

$$d = (T_p * c) \tag{II.8}$$

II.4.1.1.2 Différence Du Temps D'arrivé (TDOA)

La technologie TDOA (Time Difference of Arrival) se base sur la différence des dates d'arrivée d'un signal d'émission sur trois récepteurs distincts respectivement ou plus, en supposant que l'emplacement des récepteurs est connu et ils sont parfaitement synchronisés. Typiquement, le mobile émet un message qui est reçu par trois capteurs. Parmi ces derniers, un capteur de référence est désigné et les différences entre les instants d'arrivée du signal au niveau de la référence et des deux autres capteurs sont calculées. La précision est affectée par l'erreur de synchronisation et les trajets multiples. Elle s'améliore lorsque la distance entre les récepteurs est augmentée, car cela augmente la différence entre les temps d'arrivée.

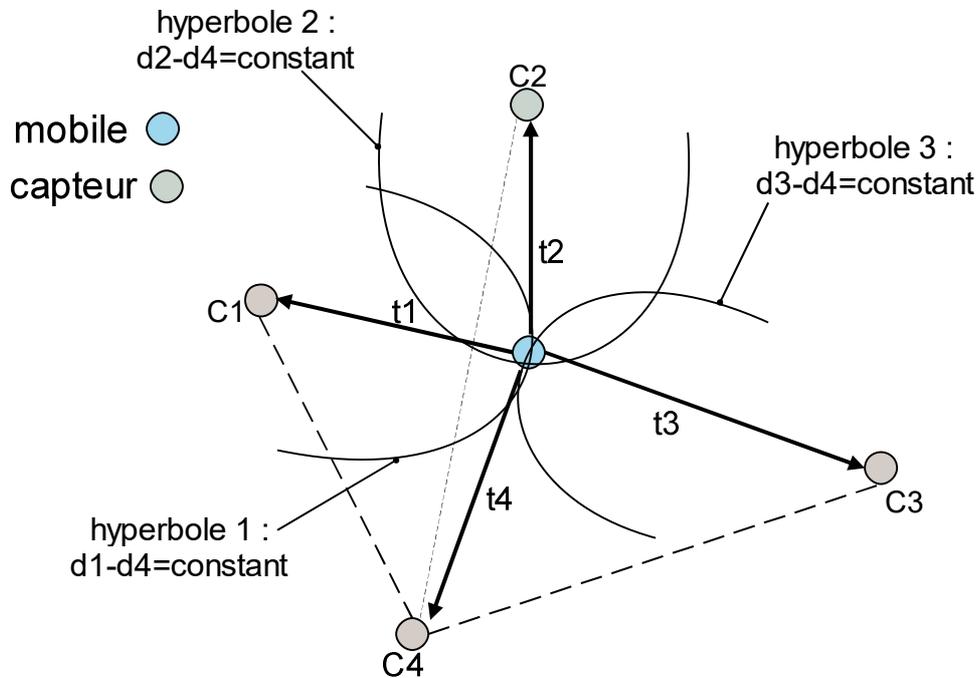


Figure II.3 : Schéma explicatif de la méthode TDOA.

Comme le montre la figure II.3, il ya trois capteurs (récepteurs) avec des coordonnées (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , et le 4ème capteur est une référence temporelle avec des coordonnées (x_4, y_4) , les temps de réception dans les trois capteurs sont respectivement t_1, t_2, t_3 temps de réception pour le capteur référence est t_4 . Les différences de temps d'arrivée au niveau de chaque récepteur sont calculées et référencées par $\Delta t_1, \Delta t_2$ et Δt_3 :

$$\Delta t_1 = t_1 - t_4 = \frac{d_1 - d_4}{c} \tag{II.9}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_4 = \frac{d_2 - d_4}{c} \quad (\text{II.10})$$

$$\Delta t_3 = t_3 - t_4 = \frac{d_3 - d_4}{c} \quad (\text{II.11})$$

Où c est la vitesse de propagation du signal de mobile.

Cette différence est ensuite convertie en une distance constante afin d'obtenir une hyperbole qui correspond à la position possible du mobile. L'équation de cette hyperbole caractérise cette distance constante. Pour déterminer une position, il faut donc trois émetteurs en vue d'obtenir trois hyperboles dont l'intersection donne la position du mobile.

Le principal inconvénient de la technique TDOA est que la différence des temps de réception peuvent être assez petits, en particulier pour la mesure à courte distance, l'estimation de distance n'est pas précise [14]. Pour surmonter ce problème, les ondes électromagnétiques peuvent être remplacées par des ondes acoustiques où la vitesse de propagation est beaucoup plus petite ($v_{acoustique} = 344m/s$) et donc le temps des différences sont largement augmentées.

Dans l'étape initiale, l'émetteur envoie à l'instant t_0 le signal radioélectrique et reçu par le récepteur au moment t_{radio} . Après un délai fixe t_{delay} , l'émetteur envoie le signal acoustique qui est reçu à l'instant t_{sound} . La figure II.4 montre l'heure retardée du modèle de calcul pour cette méthode TDOA [15]. Les deux temps reçus peuvent être écrits par :

$$t_{radio} = t_0 + \frac{d}{v_{radio}} \quad (\text{II.12})$$

Et

$$t_{sound} = t_0 + t_{delay} + \frac{d}{v_{sound}} \quad (\text{II.13})$$

Où d est la distance entre l'émetteur et le récepteur. v_{radio} Et v_{sound} sont respectivement les vitesses de transmission des signaux radio et acoustiques. En utilisant ces deux équations, la distance entre l'émetteur et le récepteur peut être calculée par :

$$d = \frac{v_{radio}v_{sound}}{v_{radio}-v_{sound}} (t_{sound} - t_{radio} - t_{delay}) \quad (\text{II.14})$$

Les deux temps t_{radio} et t_{sound} sont mesurés dans le récepteur, et la synchronisation entre l'émetteur et le récepteur n'est plus nécessaire.

CHAPITRE II : Techniques de localisation et Routage

La vitesse de l'onde acoustique v_{sound} dans l'espace libre est négligeable devant la vitesse de l'onde radio v_{radio} ce qui donne $v_{radio} - v_{sound} \approx v_{radio}$. L'équation (II.14) peut être simplifiée comme suite :

$$d \approx v_{sound}(t_{sound} - t_{radio} - t_{delay}) \quad (II.15)$$

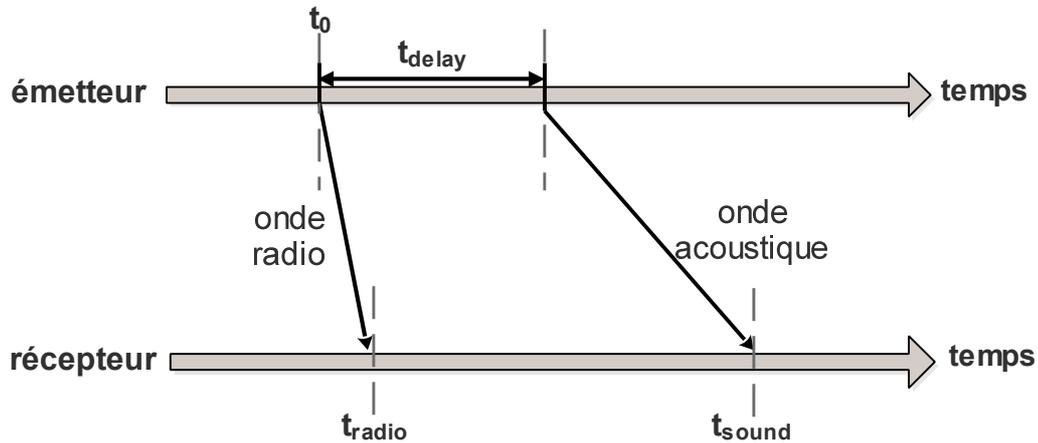


Figure II.4 : Illustration du principe TDOA.

II.4.1.1.3 Force du signal RSSI

La technologie RSSI (Received Signal Strength Indicator) est une technique de mesure qui permet de calculer la distance entre deux nœuds. Son principe consiste à considérer la perte de puissance d'un signal entre son émission et sa réception, cette perte varie en fonction de la distance c'est-à-dire plus les capteurs sont éloignés plus les pertes sont importantes et vice versa, cette perte sera alors convertie en une distance. La figure (II.5) démontre la méthode de fonctionnement du RSSI, telle que la puissance du signal émise par le mobile diminue au fur et à mesure ($P_1 > P_2 > P$).

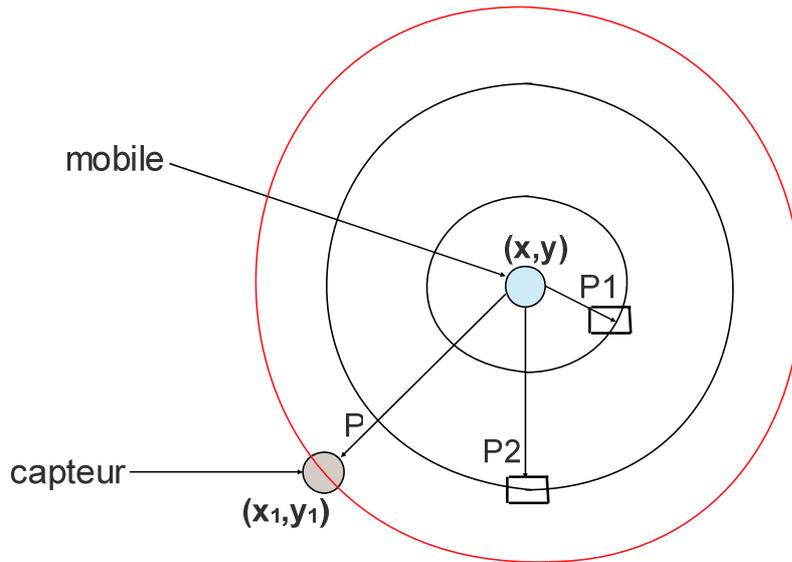


Figure II.5 : Schéma explicatif de la méthode RSSI.

Dans un espace de propagation libre la relation entre la puissance du signal et la distance de transmission est exprimée par l'équation de Fris [16] :

$$P_r(d) = \frac{p_t G_t G_r \lambda^2}{4\pi^2 d^2} \quad (\text{II.16})$$

Telle que :

- P_r et P_t sont respectivement la puissance de réception et d'émission.

- G_t et G_r sont respectivement les gains d'antenne numérique de l'émetteur et récepteur.

- d est la distance de la transmission radio.

- λ est la longueur d'onde radio défini par :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{II.17})$$

-Telles que C est la vitesse de la lumière et f est la fréquence du signal.

-A partir de l'équation (II.15), formule simplifiée pour le calcul de la distance par RSSI est obtenue :

$$d = \sqrt{\frac{P_t \lambda^2}{P_r 4\pi^2 G_r G_t}} \quad (\text{II.18})$$

CHAPITRE II : Techniques de localisation et Routage

De la relation entre les puissances transmises et reçues, nous pouvons définir *la perte du chemin PL* qui dénote l'affaiblissement de puissance lors de la propagation [17] :

$$PL = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 d^2 \quad (\text{II.19})$$

On remplace (II.16) dans (II.18), nous obtenons :

$$PL = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{2\pi}{c}\right)^2 f^2 d^2 \quad (\text{II.20})$$

Cette équation indique que *la perte du chemin* est déterminée par deux facteurs : la fréquence radio f et la distance de transmission d . La *Perte du chemin* augmente avec l'augmentation de la fréquence f et la distance d .

-La mesure du signal RSSI est représentée par l'équation suivante :

$$RSSI(d) = P_t - PL(d_0) - 20\log_{10} \frac{d}{d_0} + x_\sigma \quad (\text{II.21})$$

Où $PL(d_0)$ est la perte de signal pour une distance de référence d_0 . les variations aléatoires dans le RSSI sont exprimées comme une variable gaussienne de moyen 0 et de variance σ^2 : $x_\sigma \sim N(0, \sigma^2)$. Toutes les puissances sont données en dBm et toutes les distances en mètre.

II.4.1.1.4. Angle d'arrivée

A la place des distances, il est possible de localiser un mobile en utilisant des angles. La méthode AOA (Angle of Arrival) permet de mesurer l'angle d'arrivée d'un signal. Pour cela le capteur qui mesure l'angle doit être équipé soit par un ensemble d'antennes ou plusieurs récepteurs à ultrason. Lorsqu'un capteur reçoit un signal, il utilise la différence de phase du signal reçu entre l'antenne (ou récepteur ultrason) et le mobile pour déduire l'angle d'arrivée du signal. Cette méthode nécessite au moins deux capteurs. Pour le calcul de l'angle d'arrivée, le capteur prélève tout les T secondes une constante angulaire $\Delta\theta$, ensuite le capteur enregistre le moment où la puissance du signal est la plus forte, une différence de temps entre le moment de la réception de l'impulsion initiale et du maximum de la puissance du signal Δt , l'équation qui permet de calculer l'angle d'arrivée est [18] :

$$\theta_i = (\Delta\theta * \Delta t)/T \quad (\text{II.22})$$

Avec : $\theta_i \in [0, 2\pi]$

Ensuite la technique de triangulation est utilisée pour estimation des coordonnées de mobile. Cette technique ne nécessite pas une synchronisation entre les capteurs et la précision dépend largement sur la directivité de l'antenne et les mesures sont très sensibles par la présence de l'effet d'ombrage causé par l'environnement du captage. Ainsi la technique AOA a un intérêt limité pour la localisation à moins d'utiliser des grandes antennes directives. Et par conséquence pour les réseaux de capteurs sans fil qui possèdent des antennes de petite taille et une alimentation d'énergie limitée, cette technique reste la technique la moins performante pour notre cas.

II.4.1.2. Mesures libres (range free)

Contrairement à la méthode précédente, les techniques range free n'ont pas besoins de mesurer la distance ou l'angle entre les nœuds, mais ils accomplissent la localisation grâce à des fonctionnalités réseau et périphériques telles que la connectivité du réseau et la puissance de consommation et conservation lors de la transmission d'un signal, les distances obtenues sont utilisées pour calculer les coordonnées du nœud (x_i, y_i) , ce type de mesures aide à minimiser la consommation de l'énergie, de plus ils n'exigent aucun matériel supplémentaire.

Il existe de nombreuses techniques de mesure libres on site DV-HOP, associate point in triangulation dit (APIT).

II.4.1.2.1 DV-Hop (Distance Vector hop localisation)

La technique *DV-Hop* range free est l'une des techniques les plus utilisées dans la localisation, elle est inspirée des protocoles de routage à vecteur de distance pour donner la position estimée des nœuds basés sur le nombre de sauts. *DV-hop* s'applique en trois étapes [16].

- Dans la première étape chaque nœud ancre diffuse sa position en envoyant un message *beacon* contenant ses coordonnées x_i, y_i avec le nombre de sauts h_i (qui est initialement égale à 0), chaque nœud qui reçoit ce message maintient le nombre de saut minimum par nœud ancre de tous les messages *beacon*. Lors de la première vague, quand l'ancre A reçoit la position d'une ancre B, elle calcule la distance euclidienne qui les séparent et la divise par le nombre de sauts. Elle obtient donc une moyenne des distances des sauts entre A et B dit *hopsize* et la fait communiquer aux autres capteurs. Quand A reçoit d'autres

CHAPITRE II : Techniques de localisation et Routage

positions d'ancres, elle calibre à nouveau sa distance moyenne et fait transmettre aux capteurs cette mise à jour pour pouvoir perfectionner leurs estimations de distances.

$$hopsize_i = \frac{\sum_{i \neq j}^n \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum_{i \neq j}^n h_{ij}} \quad (II.23)$$

- Dans la deuxième étape, une vague d'inondation fournit suffisamment d'informations au capteur pour pouvoir convertir le nombre de sauts en estimation de distance. la conversion se réalise par la multiplication du nombre de sauts séparant le capteur d'une ancre par une distance moyenne entre deux capteurs voisins (la taille moyenne d'un saut appelée *HOP-size*)

$$d_{i,x} = hopsize_i \times hopcount_{i,x} \quad (II.24)$$

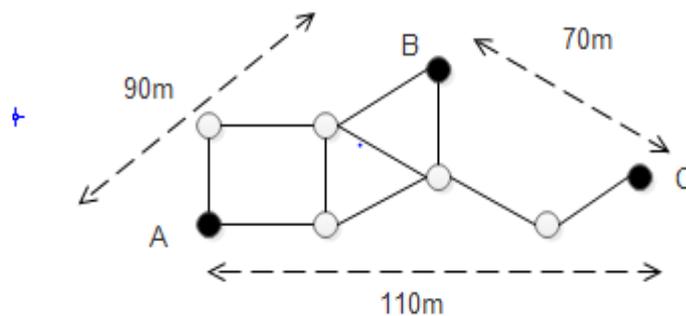


Figure II.6 : La technique DV-Hop.

- Dans la troisième étape, après que chaque nœud simple ayant obtenu trois distances (ou plus) des nœuds ancrés, on peut calculer sa position physique en utilisant des méthodes comme la trilération, comme le montre la figure (). Nous avons D la distance entre les nœuds ancrés tel que : $D(A,B)=90m$, $D(B,C)=70m$, $D(C,A)=110m$. et S est le nombre de sauts entre deux nœuds ancrés : $S(A,B)=3$, $S(B,C)=3$, $S(C,A)=4$

Chaque nœud ancre calcule et diffuse sa distance moyenne DM :

$$DM(A) = (110+90) / (4+3) = 28,57$$

$$DM(B) = (90+70) / (3+3) = 26,66$$

$$DM(C) = (110+70) / (3+4) = 25,71$$

CHAPITRE II : Techniques de localisation et Routage

Une fois qu'un nœud arbitraire «N » aura reçu la distance moyenne la plus proche, il calcule les distances le séparant de chacun des trois nœuds ancre en multipliant la distance moyenne par le nombre de sauts.

Pour obtenir ses positions, les capteurs utilisent ensuite la trilération. En reprenant l'exemple de la figure (II.6), X obtiendra sa position en résolvant le système suivant

$$\begin{cases} d^2AX = (x_X - x_A)^2 + (y_X - Y_A)^2 \\ d^2BX = (x_X - x_B)^2 + (y_X - Y_B)^2 \\ d^2CX = (x_X - x_C)^2 + (y_X - Y_C)^2 \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

De cette manière, *DV-Hop* se propose de résoudre les problèmes de la localisation de tous les nœuds.

II.4.1.2.2 APIT

APIT est un algorithme de localisation range free, l'idée principale de cette méthode est d'associer Point-In-Triangulation Test (PIT) avec des schémas par zone afin de rechercher la position cible la plus probable, PIT est adopté pour réduire la zone où se situe notre cible [16]. Supposons que de nombreux nœuds ancre, dont leurs positions sont connues par les autres capteurs, sont dispersés dans un réseau de capteurs sans fils. Comme c'est illustré dans la figure (II.7). Dans chaque expérience, trois nœuds ancre sont sélectionnées pour former un triangle et voir si la position de la cible est à l'intérieur ou à l'extérieur du triangle. Ce processus est répété jusqu'à ce que tous les triangles soient considérés. Après avoir terminé tous les tests, le point central de la zone d'intersection sera considéré comme la position estimée de notre cible. La précision de la localisation dans cette méthode dépend du nombre de test directement lié aux nombre d'ancres

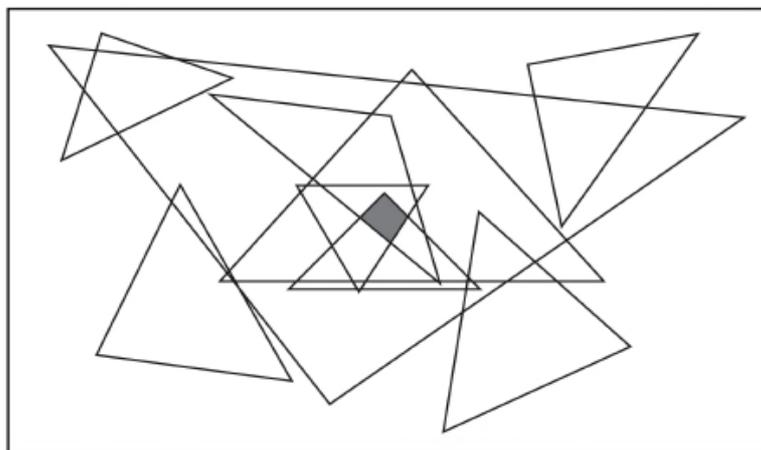


Figure II.7 : Le principe de la technique APIT [16].

II.4.1.2.3 Méthode Centroïde

La méthode Centroïde est conçue pour les réseaux de capteurs qui ont au moins trois capteurs au tour de mobile. Suppose que parmi N capteurs du réseau, on prend juste 3 capteurs voisins C1, C2, C3, dont les coordonnées sont (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , et tous les capteurs ont une propagation sphérique ainsi qu'une portée de communication identique. Le principe de Centroid est de considérer le point central Ncentroïde des capteurs comme la position estimée de mobile. La position de Ncentroïde $(X_{centroïde}, Y_{centroïde})$ pourrait être calculée comme [19]:

$$(X_{centroïde}, Y_{centroïde}) = \left(\frac{x_1+x_2+x_3}{3}, \frac{y_1+y_2+y_3}{3} \right) \quad (II.26)$$

Cette méthode a un coût de communication et de calcul très bas, et peut devenir relativement bon précision lorsque la distribution des capteurs est régulière. Cependant, lorsque la distribution des capteurs est n'est pas, la position estimée dérivée de l'algorithme de Centroid sera inexacte.

II.4.1.3 Comparaison entre Range Free et Range Based

Les méthodes de localisation Range-Free et Range-Based ne nécessitent pas de grandes ressources et sont facilement à implémenter.

Range-Based utilise des techniques de mesure de distance inter nœud, exige des équipements plus complexes avec un coût élevé en terme de calculs et de communications pour obtenir une meilleure précision de localisation.

En revanche, Range-Free a adopté le principe de simplicité et de réduction du coût et d'énergie (faible consommation d'énergie), propose des calculs plus ou moins complexes pour évaluer la position, pour cela il gagne de plus en plus l'attention des chercheurs.

II.4.2 Calcul de positionnement

La localisation est estimée par la communication entre nœud mobile localisé et nœud capteur, pour déterminer leur placement géométrique ou position. La localisation est déterminée par moyens de distance et d'angle entre les nœuds. Il y a beaucoup concepts utilisés dans la localisation tels que, trilatération, triangulation, multilatération.

II.4.2.1. Trilatération

Le processus de Trilatération [19] utilise la géométrie du cercle ou de sphère pour calculer la position d'une cible. Elle repose sur la connaissance des distances séparant la cible de différents points de référence (capteurs) et des coordonnées spatiales de ces capteurs.

Soient trois capteurs et un mobile qu'on désire localiser. L'exécution du protocole de mesure de distance a produit le triplet (d_1, d_2, d_3) .

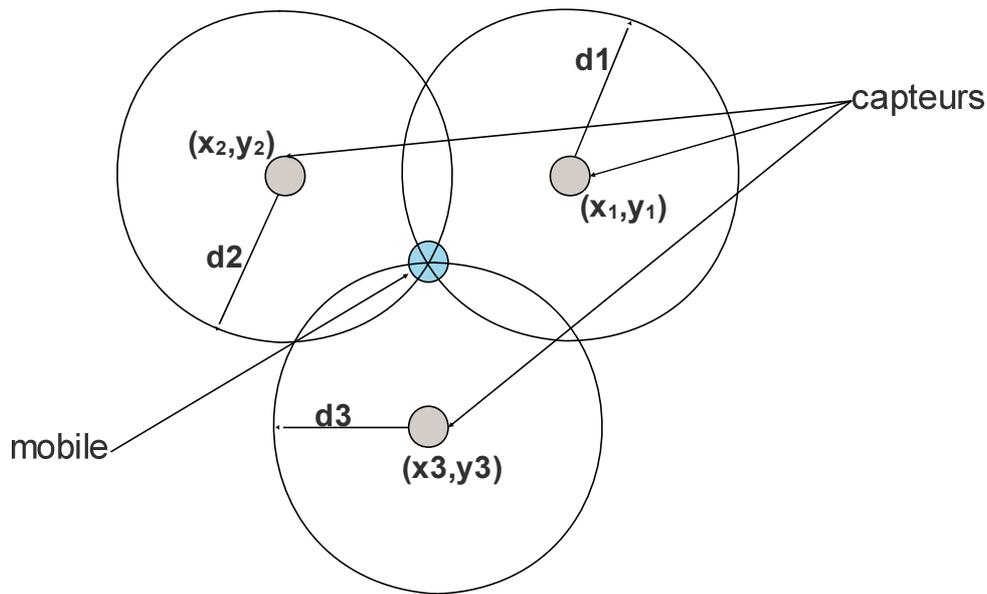


Figure II.8 : Schéma démonstratif de la Trilatération.

Comme le montre la figure II.8, quand le nombre de capteurs est égal à trois la Multilatération est également appelée Trilatération. Sous la configuration de capteurs minimum, la position de mobile peut être trouvée à partir des positionnements des trois capteurs, la relation entre le mobile et les trois capteurs est décrite comme sous dessus :

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Telle que (x, y) sont les coordonnées du mobile. (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) sont les coordonnées des trois ancres. On soustrait la première équation des autres équations, le système d'équations (II.26) peut être transformé à la matrice suivante.

$$Qx = b \quad (\text{II.28})$$

CHAPITRE II : Techniques de localisation et Routage

Q est une matrice de dimension 2×2 , x est un vecteur de coordonnées, b est un vecteur de 2 dimensions.

$$Q = \begin{pmatrix} 2(x_1-x_2) & 2(y_1-y_2) \\ 2(x_1-x_3) & 2(y_1-y_3) \end{pmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$x = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (\text{II.30})$$

$$b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^2-x_2^2+y_1^2-y_2^2+d_2^2-d_1^2 \\ x_1^2-x_3^2+y_1^2-y_3^2+d_3^2-d_1^2 \end{pmatrix} \quad (\text{II.31})$$

La solution d'équation est sous forme :

$$x = Q^{-1}b \quad (\text{II.32})$$

La solution pour la Trilateration peut être écrite sous équation :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x_1^2-x_2^2+y_1^2-y_2^2+d_2^2-d_1^2 \\ x_1^2-x_3^2+y_1^2-y_3^2+d_3^2-d_1^2 \end{pmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Telle que M est une matrice de dimension 2×2 , avec ses éléments définis comme suivant :

$$M(1,1) = \frac{1}{2} (y_1 - y_3) / C \quad (\text{II.34})$$

$$M(1,2) = \frac{1}{2} (y_2 - y_1) / C \quad (\text{II.35})$$

$$M(2,1) = \frac{1}{2} (x_3 - x_1) / C \quad (\text{II.36})$$

$$M(2,2) = \frac{1}{2} (x_1 - x_2) / C \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$$C = x_1y_2 - x_2y_1 - x_1y_3 + x_3y_1 + x_2y_3 - x_3y_2 \quad (\text{II.38})$$

II.4.2.2 Triangulation

Le principe de cette technique est basé sur le théorème de Thalès employé en géométrie et en trigonométrie pour mesurer la distance d'une cible en mesurant les angles qu'elle forme avec deux points de référence (capteurs) avec des positions connues. Cette technique se base sur les relations entre les angles et les côtés du triangle ayant comme sommets les deux capteurs et la cible (mobile). Quand les θ_1 , θ_2 deux angles d'arrivées sont

CHAPITRE II : Techniques de localisation et Routage

obtenus grâce à la méthode AOA, l'algorithme de triangulation peut être utilisé pour l'estimation de la position :

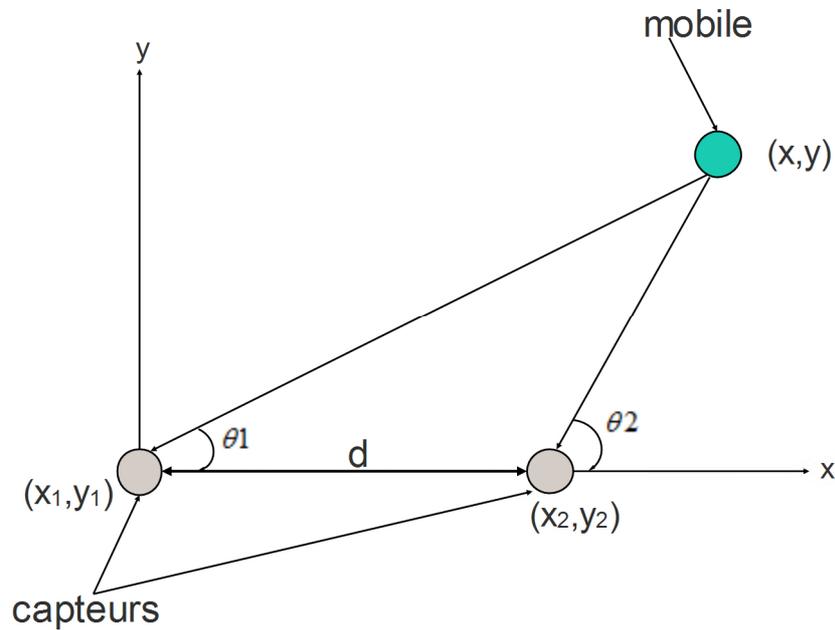


Figure II.9 : schéma démonstratif de la Tringulation.

Telle que $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ sont les coordonnées des deux capteurs, et (x, y) sont les coordonnées de mobile.

L'emplacement de mobile peut être calculé à partir de (II.39) :

$$\begin{cases} x = \frac{d \tan(\theta_2)}{\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1)} \\ y = \frac{d \tan(\theta_1) \tan(\theta_2)}{\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1)} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Où d c'est la distance entre les deux nœuds capteurs, qui peut être calculé par :

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2} \quad (\text{II.40})$$

En remplaçant l'équation (II.40) dans l'équation (II.39), on trouvés les coordonnées du positionnement de mobile :

$$\begin{cases} x = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2} \tan(\theta_2)}{\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1)} \\ y = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2} \tan(\theta_1) \tan(\theta_2)}{\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1)} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

CHAPITRE II : Techniques de localisation et Routage

La précision de la triangulation dépend fortement de l'angle d'arrivée mesuré. La précision de mesures sur la direction d'arrivée est un moyen pour garantir une meilleur précision de position. L'utilisation de plus de capteurs peut également améliorer la performance de la localisation [19].

II.4.2.3 Multilateration

La multilatération [19] est une méthode populaire pour le calcul de la position d'une cible. La multilateration nécessite au moins trois capteurs implémentés pour la localisation. Cette méthode détermine la position d'une cible par le point d'intersection de trois hyperboles calculées sur la base de décalage de temps d'arrivée des signaux ou TDOA. Une hyperbole définit la position relative de la cible par rapport à une paire de capteurs de coordonnées (x_i, y_j) , en se basant sur un rang de différence constant. L'équation d'une hyperbole est donnée comme suit :

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j = \frac{1}{c} (\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}) \quad (\text{II.42})$$

Tel que $(i \neq j)$

t_i, t_j est le temps d'arrivée du signal au niveau des capteurs i et j , C représente la célérité (vitesse de propagation du signal), avec un nombre N de nœuds capteurs. L'estimation de la position revient à résoudre le système d'équation avec les positions des capteurs connus et la position du mobile inconnu (x, y) :

$$\begin{pmatrix} \left(\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2} \right) - C * \Delta t_{iN} \\ \vdots \\ \left(\sqrt{(x_{N-1} - x)^2 + (y_{N-1} - y)^2} - \sqrt{(x_N - x)^2 + (y_N - y)^2} \right) - C * \Delta t_{N-1,N} \end{pmatrix} = 0 \quad (\text{II.43})$$

Le schéma de la multilateration pour $N = 4$ est illustré dans la figure (II.10).

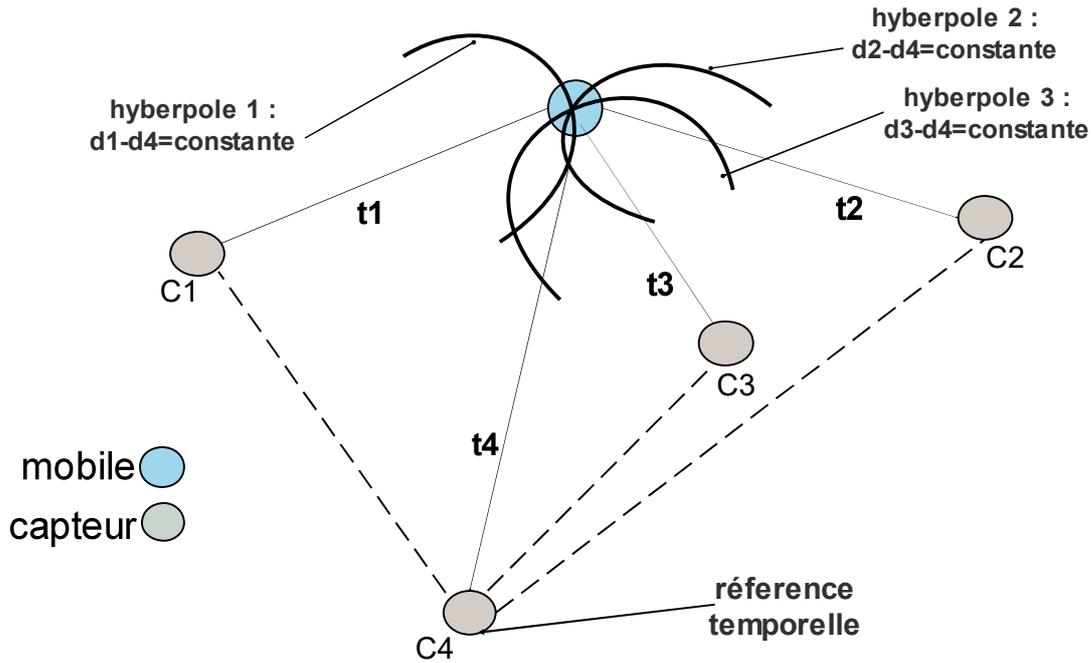


Figure II.10 : Schéma explicatif de la Multilateration.

Les équations des trois hyperboles sont :

$$\begin{cases} 0 = c(t_2 - t_4) - \frac{d_2^2}{ct_2} + \frac{d_4^2}{ct_4} + 2x \left(\frac{x_2}{ct_2} - \frac{x_4}{ct_4} \right) + 2y \left(\frac{y_2}{ct_2} - \frac{y_4}{ct_4} \right) \\ 0 = c(t_2 - t_3) - \frac{d_2^2}{ct_2} + \frac{d_3^2}{ct_4} + 2x \left(\frac{x_2}{ct_2} - \frac{x_3}{ct_4} \right) + 2y \left(\frac{y_2}{ct_2} - \frac{y_3}{ct_3} \right) \\ 0 = c(t_3 - t_4) - \frac{d_3^2}{ct_3} + \frac{d_4^2}{ct_4} + 2x \left(\frac{x_3}{ct_3} - \frac{x_4}{ct_4} \right) + 2y \left(\frac{y_3}{ct_3} - \frac{y_4}{ct_4} \right) \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

II.5 le routage

Le routage consiste à acheminer un message d'un capteur vers un autre. Souvent, les réseaux contiennent une station de base chargée de collecter l'ensemble des informations perçues par les capteurs. Il s'agit alors de transmettre ces informations point à point vers le nœud sink [20].

II.5.1 Types de routage

II.5.1.1 Routage plat

Appelé également routage à un niveau, tous les nœuds ont les mêmes rôles et fonctionnalités. L'ensemble collabore à la tâche d'acquisition d'information (captage) et à leur

CHAPITRE II : Techniques de localisation et Routage

(re)transmissions. Le routage peut être proactif ou réactif. Pour le premier cas, les routes seront choisies dès le déploiement des nœuds et sont disponibles en permanence pour la transmission des données (informations). Dans le deuxième cas, les routes ne sont établies qu'aux besoins. Aussitôt que les informations demandées sont acheminées à la destination, les routes utilisées seront supprimées [23].

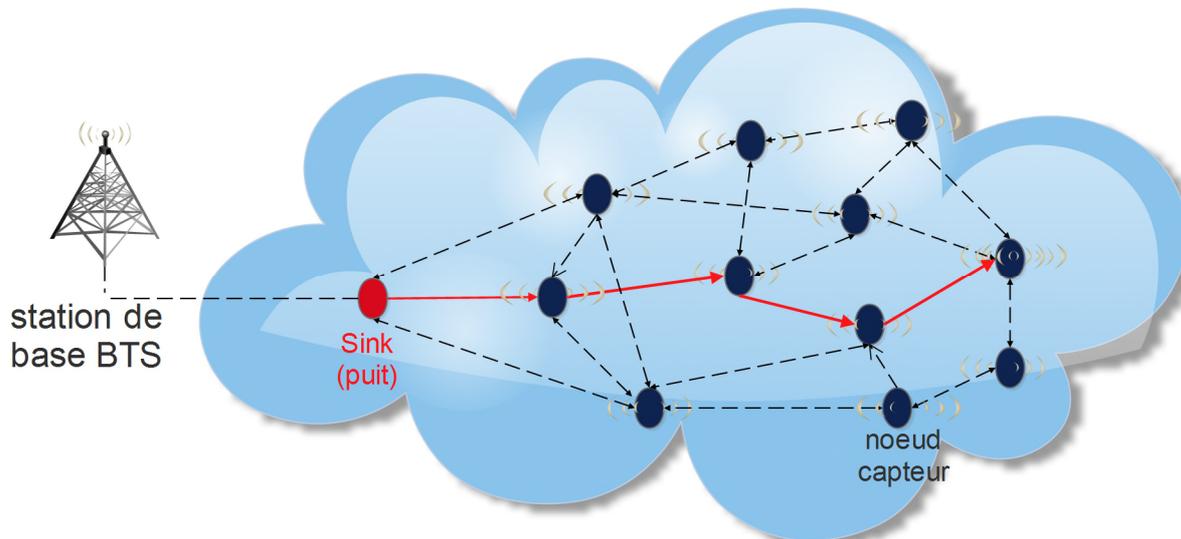


Figure II.11 : Schéma explicatif du Routage Plat.

II.5.1.2 Routage Hiérarchique

En cause de la densité élevée des capteurs, un routage plat peut entraîner la surcharge de la station de base ou du nœud sink. Cette surcharge engendrerait l'augmentation de la latence (délai) et une consommation excessive d'énergie. Pour y remédier à la charge de trafic importante sans dégrader la QoS, le réseau est subdivisé en clusters. L'idée principale étant celle de réserver la part de consommation énergétique dévolue aux communications multi-sauts à l'intérieur du cluster. On minimise ainsi largement le nombre de communication en direction du sink. Dans chaque cluster, un nœud particulier le cluster-Head peut alors en fonction de ses capacités se charger d'agréger les données de cluster avant de les acheminer vers la station de base en un seul saut ou par multi-sauts impliquant les autres cluster-heads. La mise en place des clusters et la sélection des cluster-heads contribuent à économisation de la consommation énergétique des nœuds et la durée globale du réseau, passage à l'échelle [23].

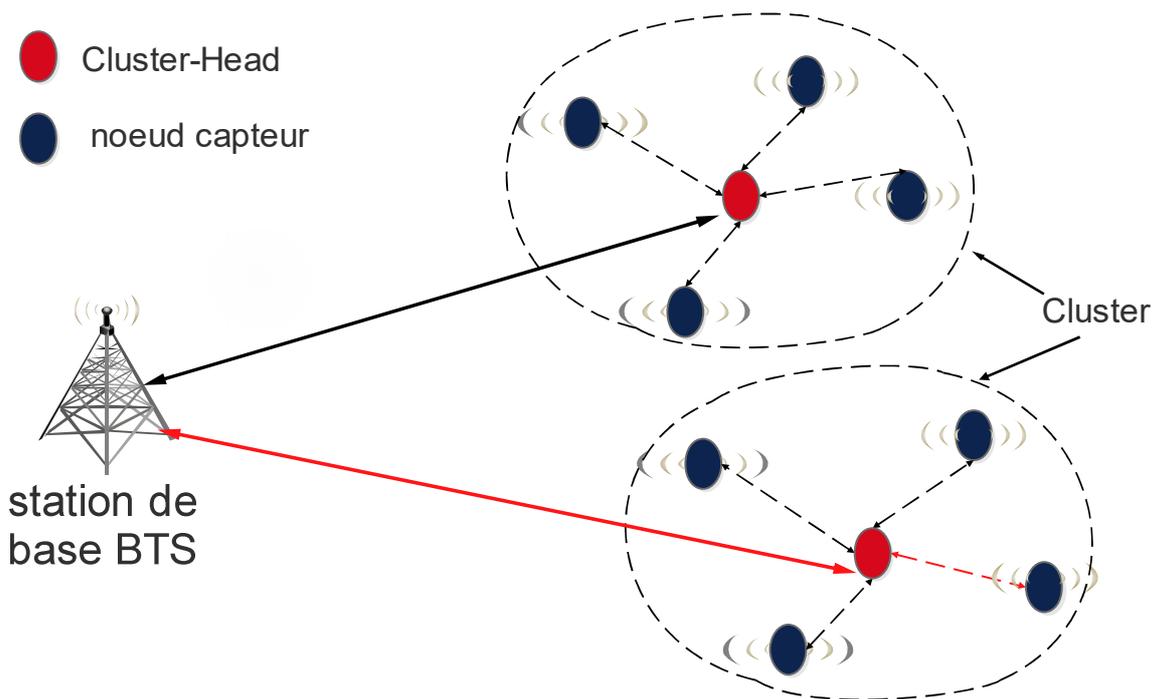


Figure II.12 : Schéma explicatif du Routage Hiérarchique.

II.5.1.3 Routage basé sur la position des nœuds

Dans cette méthode appelée également routage géographique, les informations sur la position des nœuds sont exploitées pour router les informations dans le réseau [21]. Le partage des informations de position entre les voisins permet de calculer des coordonnées réelles et ainsi estimer la distance qui les sépare. Pour cela plusieurs techniques peuvent être utilisées comme le RSSI qu'on a vu dans la première partie de ce chapitre. Toutefois, un inconvénient majeur de cette technique est qu'elle n'est pas très précise pour estimer la distance entre nœuds [22]. Des solutions hybrides utilisant quelques ancres (nœuds robustes avec GPS) disséminés dans le réseau sont proposées. Les autres nœuds calculent leurs coordonnées virtuelles par rapport à ces ancres via des solutions plus efficaces en énergie et acheminent le trafic sur la base des coordonnées calculées.

II.5.2 Métrique de routage

Une métrique de routage est une information quantitative ou qualitative exploitée pour évaluer le coût d'un chemin. Le meilleur chemin du point de vue du routage est celui qui satisfait toutes les contraintes (lorsqu'il n'existe pas) et au coût le plus faible selon la métrique utilisée. Il faut savoir que la métrique de routage et ses contraintes ne sont pas indépendantes,

l'une par rapport à l'autre. Par exemple, on pourrait construire des routes offrant le nombre de sauts minimum, tout en supprimant les liens quand les délais dépassent une valeur donnée. La valeur de la métrique est influencée par de différents facteurs. Les facteurs internes sont ceux liés au réseau lui-même, dépendant directement ou indirectement du trafic généré par le réseau, on peut citer par exemple l'interférence interne (au réseau) et l'énergie consommée. Les facteurs externes sont ceux liés à l'environnement, donc ils ne sont pas sujets aux conditions du trafic, parmi ceux-ci on cite la position du nœud, sa mobilité et l'interférence dues aux sources externes au réseau.

II.5.2.1 Types de métriques

On peut classer les métriques selon les caractéristiques qu'elles créent ou suivant leurs propriétés mathématiques.

- **Métrique de nœud ou de lien**

Ce type de métrique diffère l'objet sur lequel est réalisée la mesure. Quand il s'agit du canal de communication entre les nœuds, on parle de métrique de lien ; dans le cas contraire on parle de métrique de nœud. Les facteurs entrant dans la métrique de nœud sont : ressource mémoire, ressource CPU, énergie résiduelle, état de surcharge, agrégation des données. Et les facteurs entrant dans la métrique de lien sont : le débit (bande passante instantanée), la latence (délai), fiabilité, couleur (politique selon le type du trafic).

- **Métrique statique ou dynamique**

Une métrique est dite statique si sa valeur ne change pas dans le temps et elle est dite dynamique dans le cas contraire. La métrique dynamique pour les RCF est caractérisée par la variabilité de quelques paramètres du réseau, on cite la qualité du lien réseau, intensité du trafic. La valeur d'une métrique dynamique peut changer à une fréquence élevée dans le temps, Pour diminuer l'impact de ces changements sur les décisions de routage, on doit s'appuyer sur des algorithmes de calcul à *base de seuil* qui déclenche l'envoi des mises à jour aux voisins à des moments précis. Contrairement à la métrique statique qui ses paramètres ne changent pas dès la mise en œuvre de la métrique, parmi les paramètres de la métrique statiques on cite le nombre d'interface du nœud.

- **Métrique unidimensionnelle ou multidimensionnelle**

Une métrique multidimensionnelle pour le routage est représentée comme un vecteur de valeurs, chacune de ces valeurs étant décrite par une métrique unidimensionnelle. On la désigne encore sous le terme « métrique multiple » car elle peut se décomposer en ses composantes unidimensionnelles. Il serait par exemple possible de combiner le nombre de sauts et le débit pour construire une métrique multidimensionnelle qui exhibe les propriétés de ses deux métriques de base. L'utilisation de ce type de métrique permet d'optimiser plus d'un aspect de performance réseau [23].

II.5.2.2 Informations liées à l'implémentation de la métrique

Il existe plusieurs façons pour les nœuds de réseau d'acquérir les informations dont ils ont besoin pour le calculer de la métrique du routage :

-Surveillance passive (passive monitoring) du réseau : les données nécessaires sont assemblées par le nœud, par l'analyse du trafic entrant ou sortant. En associant ces données avec d'autres informations ou en appliquant une formule mathématique, la métrique est obtenue. Cette méthode est utilisée par exemple pour estimer le débit des données transitant par un nœud.

-Informations liés au nœud : Dans ce cas, aucun effort n'est effectuée par le nœud pour l'acquisition des mesures souhaitées. Une simple lecture de valeur dans les variables d'environnement ou systèmes est réalisée. On peut citer par exemple le calcul de la taille de la file d'attente des paquets.

-Piggy-backing : Pour la conception de cette métrique, le nœud insère des informations additionnelles (obtenues par sondage) au trafic régulier ou aux paquets du contrôle de routage. Cette méthode est très employée pour la mesure du délai de bout-en-bout.

-Sondage Active (Active Probing) : Les paramètres de la métrique sont influencés par le sondage que le nœud prévoit de calculer, pour collecter ces informations, des paquets spécifiques sont envoyées à travers le réseau. Cette méthode est utilisée par exemple pour le sondage de taux de pertes des paquets.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé dans la première partie les différentes méthodes utilisées pour la localisation d'un mobile dans les réseaux de capteur sans fil, et les techniques implémentées dans un capteur et leurs déroulement mathématique, telle que : AOA, TOA, TDOA, RSSI. Ainsi que les méthodes de calcul de positionnement (triangulation, trilatération, multilatération). Alors que dans la seconde partie nous nous sommes focalisés sur les différents types de routage des informations collectées par un capteur comme l'information de localisation d'un mobile. Et les métriques implémentées pour le routage dans les réseaux de capteurs sans fil.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude du filtre de Kalman, nous allons aborder son déroulement ainsi que son développement mathématique.

CHAPITRE III

Etude du filtre de Kalman

III.1 Introduction

Les mesures utilisées pour la localisation sont souvent entachées de bruit (bruit ambiant, sensibilité des équipements, interférences....etc.). Pour améliorer l'estimation de la position, il est proposé d'utiliser des filtres tenant compte de la mesure, de la distance séparant les capteurs de mobile, de la position initiale et des modèles de propagations des signaux. De nombreuses applications requièrent un traitement des données issues des capteurs. Le filtrage de Kalman introduit en 1960 par Rudolf E. Kalman [18] propose une solution à ces problèmes d'estimation des paramètres.

L'objectif de ce chapitre est de présenter le filtre de Kalman (Kf), et donner une étude sur ce dernier, ensuite nous proposerons une modélisation du filtre de Kalman, nous expliquerons les différentes étapes de déroulement de ce filtre, et finirons par le filtre de Kalman Etendu (EKF).

III.2 Etude du filtre de Kalman (Kf)

Etude du filtre de Kalman nécessite la connaissance de certaines notions, pour commencer on va faire quelques rappels sur les estimateurs, en suite on décrira le principe du filtre de Kalman.

III.2.1 Estimateur

En mathématique, un estimateur est une statistique permettant d'estimer qu'un seul paramètre, mais il est possible d'estimer plusieurs paramètres inconnus au même temps, dans ce cas, on parlera plus des paramètres à estimer, mais du vecteur à estimer ou d'état.

III.2.2 Propriété d'un estimateur

- **Le biais**

En statistique un biais est une démarche ou un procédé qui engendre des erreurs dans les résultats d'une étude. Le biais de l'estimateur est la différence moyenne entre sa valeur et celle du paramètre qu'il estime. Pour obtenir un estimateur parfait, le biais doit être égal à 0, dans ce cas on dit que l'estimateur est sans biais.

- **La variance**

Un estimateur est dit à variance minimal lorsque l'on a réussi à minimiser les variations entre le vecteur d'état réel et son estimation. On a donc minimisé l'erreur quadratique moyenne RMSE [24] Dans ce cas l'estimateur est dit optimal.

- **Convergence**

Une des propriétés principales que l'estimateur doit respecter est sa convergence. En d'autres termes, lorsque la taille des échantillons tend vers l'infini, il faut que l'estimateur se rapproche du paramètre qu'il estime.

III.2.3 Estimateur optimal

Un estimateur dont le biais est nul aura une variance toujours supérieure ou égale à ce que l'on appelle "la borne inférieure de Cramer-Rao". Finalement, c'est assez logique, on peut ne pas obtenir une variance nulle et donc, on ne peut pas connaître exactement la valeur du vecteur d'état. On aura toujours une incertitude égale à la borne de Cramer-Rao pour l'estimateur optimal. Si la variance est nulle, alors ce n'est plus un problème d'estimateur, car ça voudrait dire que l'on connaît la valeur à estimer dès le départ [24].

Dans certain cas, pour avoir un estimateur sans biais à variance minimale, il faut que le système respect quelques exigences :

- Le bruit doit être Gaussien.
- Le système doit être linéaire.

Cet estimateur est appelé "Estimateur sans biais à variance minimale linéaire gaussien", ou encore "Estimateur optimal linéaire gaussien" ou tout simplement "Méthode des moindres carrés".

III.3 Modélisation du filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est un estimateur récursif. Cela signifie que pour estimer l'état courant d'un système, l'estimation de l'état précédent et des mesures actuelles sont nécessaires. Le principe d'un tel filtre repose sur un modèle à variables d'état basé sur deux équations [25]:

- Une équation prédisante le nouvel état du système x_{K+1} en fonction du dernier état connu x_k .

- L'équation d'observation (ou de mesure) du processus y_K (vecteur de mesure).

Les équations de base du filtre de Kalman sont alors les suivantes :

$$\begin{cases} x_{K+1} = A_{K+1} * x_k + w_K & w_K \sim N(0, Q_K) & \text{(III. 1)} \\ y_K = H_K * x_k + v_K & v_K \sim N(0, R_K) & \text{(III. 2)} \end{cases}$$

Où

- A_{K+1} la matrice de prédiction de nouvel état du système en fonction du dernier état connu.
- x_k est un vecteur représentant l'état du système.
- w_K est le bruit de modélisation lié à l'incertitude que l'on a sur le modèle de processus.
- v_K est le bruit de mesure.
- y_K est le vecteur contenant les mesures effectuées à l'instant K .
- H_K est une matrice d'observation (mesure) reliant la mesure à un état du système, cette matrice est affecté par un bruit v_K de moyenne nulle.

De plus w_K et v_K sont des bruit gaussien et respectivement de la matrice de covariance Q_K , de la variance R_K :

$$E[w_K w_K^T] = Q_k$$

$$E[v_K v_K] = R_k$$

Le but est de déterminer une estimation récursive des x_k à partir des mesures y_K et du modèle de génération du processus.

III.4 Déroulement du Filtrage de Kalman

Après modélisation, le système détermine toutes les matrices indispensables, nous allons suivre les étapes qui mènent aux équations du filtre de Kalman. Si les équations (III.1) (III.2) sont réunies, le filtre de Kalman est le filtre optimal pour l'estimation de l'état du système. Comme le montre la figure (III.1), le filtre de Kalman se déroule en trois étapes : La Prédiction, Mise à jour, et l'initialisation.

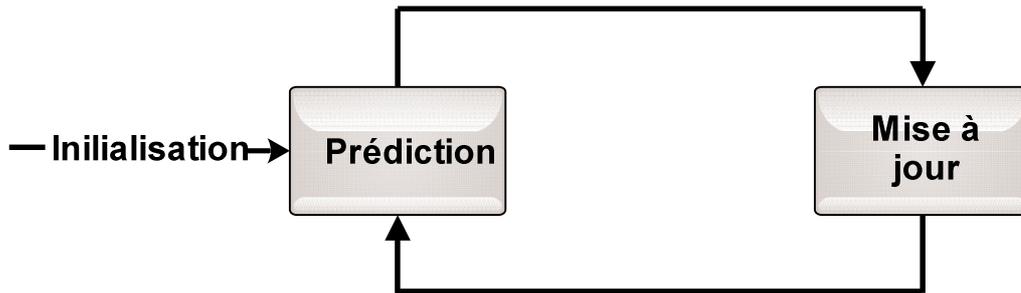


Figure III.1 : Les étapes du filtre de Kalman.

III.4.1 Etape d'initialisation

Cette étape consiste à calculer les valeurs initiales du vecteur d'état \hat{x}_0 , la matrice de covariances de l'erreur d'estimation P_0 .

$$\hat{x}_0 = E[x_0] \quad (III.3)$$

$$P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0^T)] \quad (III.4)$$

III.4.2 Etape de Prédiction

On se place à l'instant $K + 1$. A cet instant, on dispose d'une estimation initiale fondée sur la connaissance du processus et des mesures jusqu'à l'instant précédent, c'est-à-dire K . Cette estimation est appelée estimation à priori.

Etant donné (III.1) :

$$\hat{x}_{K+1} = A_{K+1} * \hat{x}_K \quad (III.5)$$

Si on notera \hat{x}_{K+1} l'estimation d'état à priori, donc l'erreur à priori est notée par :

$$e_{K+1} = (x_{K+1} - \hat{x}_{K+1}) \quad (III.6)$$

La matrice de covariance d'erreur à priori est :

$$P_{K+1} = E[e_{K+1}e_{K+1}^T] \quad (III.7)$$

En remplaçant (III.6) dans (III.7), on a :

$$P_{K+1} = E[(x_{K+1} - \hat{x}_{K+1})(x_{K+1} - \hat{x}_{K+1}^T)] \quad (III.8)$$

Et en utilisant les équations (III.1) (III.2), la matrice de covariance d'erreur à priori s'écrit alors :

$$P_{K+1} = A_{K+1}P_K A_{K+1}^T + Q_K \quad (\text{III.9})$$

D'où P_K est la matrice de covariance d'erreur à posteriori.

Nous venons ainsi d'établir une première relation entre la matrice de covariance de l'erreur à priori et à postérieure.

III.4.3 Etape de mise à jour (correction)

Nous allons maintenant utiliser la mesure y_K pour corriger l'estimation à priori $\hat{x}_{K/K-1}$ et obtenir l'estimation à posteriori $\hat{x}_{K/K}$.

A ce niveau du développement de l'algorithme, nous abordons le point clef de l'estimation récursive du vecteur d'état. A cet effet, nous adoptons une estimation linéaire du vecteur d'état de la forme [26] :

$$\hat{x}_{K/K} = \hat{x}_{K/K-1} + K_K[y_K - H_K \hat{x}_{K/K-1}] \quad (\text{III.10})$$

K_K est le gain du filtre de Kalman.

L'erreur à postérieure est donnée par:

$$e_{K/K} = (x_K - \hat{x}_{K/K}) \quad (\text{III.11})$$

En remplaçant l'équation (III.10) dans (III.11), on trouvera :

$$\begin{aligned} e_{K/K} &= (x_K - \hat{x}_{K/K-1} - K_K[y_K - H_K \hat{x}_{K/K-1}]) \\ &= (1 - K_K H_K)[x_K - \hat{x}_{K/K-1}] - K_K v_K \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

La matrice de covariance d'erreur à posteriori s'écrit alors :

$$\begin{aligned} P_{K/K} &= E[e_{K/K} e_{K/K}^T] \\ &= E [((1 - K_K H_K)[x_K - \hat{x}_{K/K-1}] - K_K v_K)((1 - K_K H_K)[x_K - \hat{x}_{K/K-1}])^T] \\ &= E [((1 - K_K H_K)[x_K - \hat{x}_{K/K-1}](1 - K_K H_K)^T [x_K - \hat{x}_{K/K-1}]^T) + E[K_K v_K K_K^T v_K^T] \\ &= (1 - K_K H_K)(1 - K_K H_K)^T E[[x_K - \hat{x}_{K/K-1}][x_K - \hat{x}_{K/K-1}]^T] + E[K_K K_K^T] E[v_K v_K^T] \\ &= (1 - K_K H_K)(1 - K_K H_K)^T P_{K/K-1} + [K_K K_K^T R^T] \end{aligned} \quad (\text{III.13})$$

Nous venons ainsi d'établir une relation entre la matrice de covariance de l'erreur à posteriori et la matrice de covariance de l'erreur à priori $P_{K/K-1}$.

Pour trouver l'expression du gain de filtre de Kalman, en dérivant l'équation (III.13) par rapport à K_K , $\frac{\partial P_{K/K}}{K_K} = 0$

On obtient :

$$P_{K/K-1} H_K^T = K_K [P_{K/K-1} H_K H_K^T + R^T] \quad (\text{III.14})$$

Ce qui nous donnera :

$$K_K = P_{K/K-1} H_K^T [P_{K/K-1} H_K H_K^T + R^T]^{-1} \quad (\text{III.15})$$

On peut simplifier l'équation de la matrice de covariance de l'erreur à posteriori, en remplaçant (III.15) dans (III.13). Nous aurons:

$$P_{K/K} = [1 - K_K H_K] P_{K/K-1} \quad (\text{III.16})$$

III.5 Les limites de filtre de Kalman

Le filtrage de Kalman est une méthode d'estimation et de prédiction puissante prenant en compte la modélisation du système. Néanmoins, ce filtre n'est pas forcément l'outil à appliquer dans tous les cas [25].

En effet, le système doit être modélisé assez précisément afin d'obtenir un filtre efficace. Le problème provient du fait que certains systèmes sont difficilement modélisables et encore moins linéaires. Dans le cas où la modélisation est trop approximative, le filtre n'est pas assez performant et l'erreur des estimations ne convergera pas assez rapidement provoquant alors un temps de calcul trop important.

Pour pallier au problème des systèmes non linéaires un filtre de Kalman étendu a été développé et permet de prendre en compte une modélisation non linéaire. Néanmoins, cette technique a quelques défauts. En premier lieu, la covariance de l'erreur ne converge pas obligatoirement. En effet, si le passage d'une estimation à une autre tend à sortir de la zone de linéarité, alors le modèle linéarisé n'est plus valable et il est possible que le filtre diverge. Le second défaut est le temps de calcul plus important. En effet, de nouvelles matrices coûteuses rentrent en jeu, ce qui peut être une limite à son utilisation.

Une autre limite importante d'une telle méthode est que le filtre de Kalman permet de prendre en compte uniquement un modèle de bruit gaussien. Cette restriction limite donc l'utilisation du filtre de Kalman.

Le filtre de Kalman est donc une méthode d'estimation intéressante, mais qui n'est utilisable que lorsque l'on peut décrire assez précisément notre système. S'il est impossible de trouver une modélisation correcte du système, il est préférable de se tourner vers d'autres méthodes.

III.6 Filtre de Kalman étendu EKF

Le filtre de Kalman étendu EKF (Extended Kalman Filter) développé par Stanley F. Schmidt est l'approche la plus populaire pour traiter les systèmes non linéaires. Le non linéarité peut se trouver soit dans le modèle de mesure, soit dans le modèle du processus ou dans les deux au même temps. Le fonctionnement du filtre de Kalman étendu consiste simplement à linéariser toutes les équations afin de pouvoir appliquer le filtre de Kalman classique. La linéarisation du système s'effectue en remplaçant les équations du vecteur d'état liant le nouvel état du système en fonction de l'état précédents par :

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k) + w_k \\ y = h_k(x_k) + v_k \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Tout comme le filtre de Kalman classique w_k et v_k représentent des bruits blancs gaussiens de moyenne nulle et respectivement de covariances Q_k et R_k

Le principe du filtre de Kalman étendu EKF est d'utiliser le développement de Taylor au premier ordre.

Où f et h sont des fonctions non linéaires, la linéarisation s'effectue autour de la position prédite.

$$A_{k+1} = \frac{\partial f}{\partial x} | \hat{x}_k \quad (\text{III.18})$$

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial x} | \hat{x}_k \quad (\text{III.19})$$

Après avoir réalisé la linéarisation grâce aux dérivées partielles aussi appelée matrice jacobéenne, le filtre de Kalman étendu peut être appliqué de la même façon que le filtre de Kalman classique. De cette manière les équations de prédiction et de mise à jour deviennent :

- **Etape de prédiction :**

$$\hat{x}_{k+1} = f(\hat{x}_k) \quad (\text{III.20})$$

$$P_{k+1} = A_{k+1}P_kA_{k+1}^T + Q_k \quad (\text{III.21})$$

- **Etape mise à jour :**

$$K_k = P_{k/k-1}H_k^T [H_kH_k^T P_{k/k-1} + R_k]^{-1} \quad (\text{III.22})$$

$$P_{k/k} = [1 - K_kH_k]P_{k/k-1} \quad (\text{III.23})$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k/k-1} + K_k[y_k - H_k\hat{x}_{k/k-1}] \quad (\text{III.24})$$

Le filtre de Kalman étendu est une méthode qui n'arrive pas toujours à estimer une meilleure précision, car il dépend en grande partie de l'état initiale, mais dans notre cas il s'agit d'une cible statique ce qui implique que le filtre de Kalman étendu pourra produire des résultats satisfaisants.

I.7 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter une technique de localisation très complexe, qui est le filtre de Kalman utilisé dans la localisation pour le cas d'un système non-linéaire.

Dans le prochain chapitre, nous le consacrerons à l'interprétation et comparaison des résultats obtenues sous-Matlab des différentes techniques de localisation présentées dans le chapitre 2, Ainsi qu'au filtre de Kalman étendu (EKF), on présentera notre 2ème logiciel qui s'agit de Cup-Carbon.

CHAPITRE IV

Applications des techniques de localisation

IV.1 Introduction

La localisation de personnes ou la localisation d'un objet cible passif joue un rôle important dans de nombreuses applications de systèmes de positionnement de réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Tels que, localiser les victimes dans les avalanches ou les tremblements de terre, skieur blessé sur la pente de ski, le personnel militaire, les pompiers ou les enfants perdus. Généralement, ces applications nécessitent des exigences de très haute précision, une faible consommation d'énergie et une faible complexité, ce qui fait de la technologie ultra large bande le meilleur candidat dans ces scénarios. D'autre part, Un système de localisation implique sur une infrastructure contenant un ensemble des capteurs permettant d'obtenir les informations nécessaires. Ces informations sont transmises à une partie intelligente permettant de traiter les données acquises et d'extraire l'information nécessaire pour déterminer la position. Dans ce chapitre, nous allons comparer les différentes techniques étudiées dans la littérature ainsi que la localisation basée sur l'utilisation d'un filtre de Kalman.

IV.2 Localisation par la technique AOA

Afin de voir la variation de l'angle d'arrivée dans la simulation nous avons considéré deux capteurs déployés sur une surface d'étude. Nous aimerions localiser un utilisateur se trouvant dans le champ de rayonnement des deux capteurs. Nous considérons que le rapport signal sur bruit est de 10dB et le nombre d'échantillons est de 5. La direction de l'angle est calculée en fonction du pseudo spectre angulaire en utilisant l'estimation spectrale maximale de l'entropie ainsi que le spectre de prédiction linéaire. Le premier est une méthode d'estimation spectrale, nous essayons de trouver l'estimation spectrale dont la transformée de Fourier inverse correspond aux coefficients d'auto-corrélation connus. Tandis que le second est une opération mathématique dans laquelle les valeurs futures d'un signal à temps discret sont estimées comme une fonction linéaire des échantillons précédents. Les résultats obtenus de la variation de l'angle sont donnés dans les figures ci-dessous.

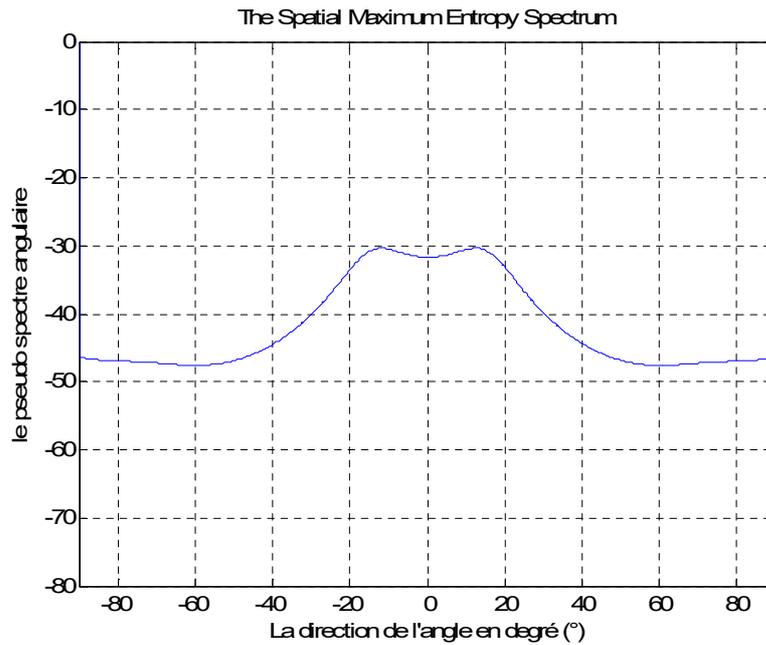


Figure IV.1 : Direction de l'angle en utilisant la méthode d'estimation spectrale entropique.

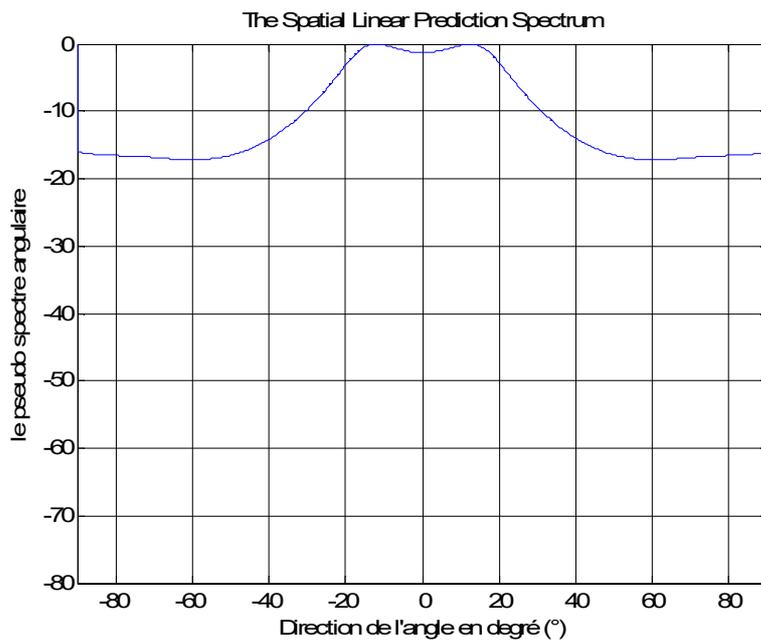


Figure IV.2 : Direction de l'angle en utilisant la méthode de spectre de prédiction linéaire.

D'après les schémas, on peut voir clairement que la méthode du spectre de prédiction linéaire atteint une résolution supérieure que celle de l'estimation spectrale entropique. Cependant, il donne de bons résultats car il détecte bien toutes les sources quel que soit le niveau de bruit.

IV.3 Localisation par technique de Trilatération

Dans ce cas, nous proposons une variante sur la Trilatération standard qui serait entièrement réalisée à l'aide des mesures embarquées et permettrait de reconstruire avec précision l'emplacement d'un objet sur une surface entre trois capteurs. L'algorithme pourrait être mis en œuvre en utilisant des emplacements connus de l'objet que nous aimerions localiser par cette technique. Selon le cas de la Trilatération, nous passons du point estimé initial, qui est souvent le point milieu de la zone probable, au récepteur le plus proche de l'expéditeur, c'est-à-dire celui qui a fourni la plus petite distance de l'expéditeur.

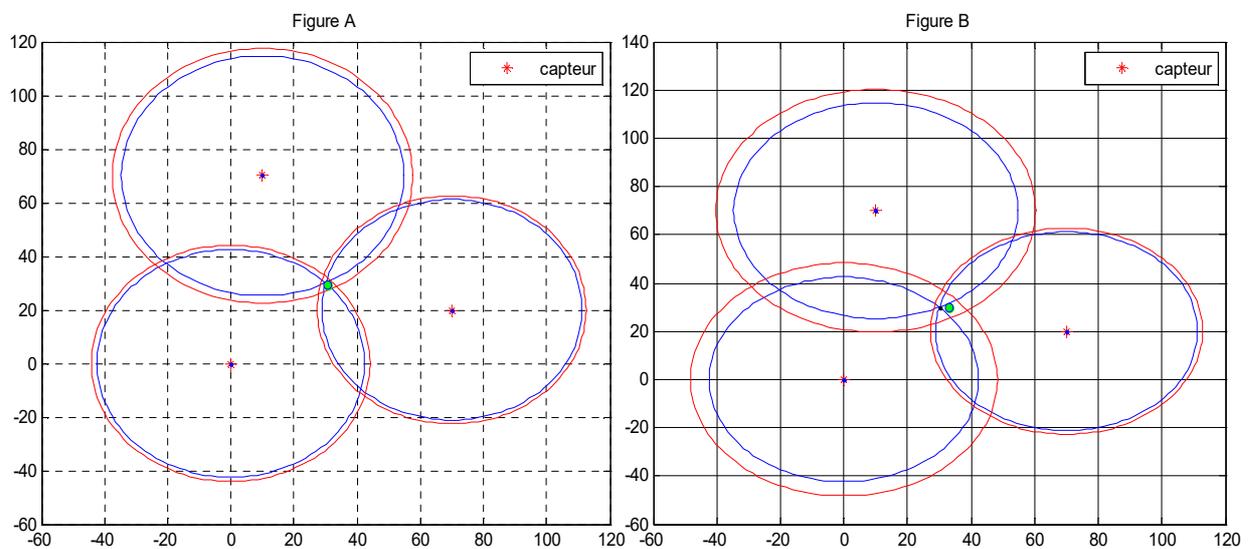


Figure IV.3 : Estimation de la position en utilisant la Trilatération.

La position estimée comme le montre la figure IV.3 est entre l'intersection des trois cercles en rouge. La position initiale du mobile est incrémentée en (30,30) mètre, l'estimation de la position est donnée au niveau (31, 31.54) soit une erreur de 1.0415 m (voir la figure A). Nous avons re-simulé une autre fois l'estimation de l'erreur est de 3.0478 m (voir la figure B). La variation de l'erreur avec la Trilatération pour 10 simulations est donnée par le graphe de la **Figure IV.4**

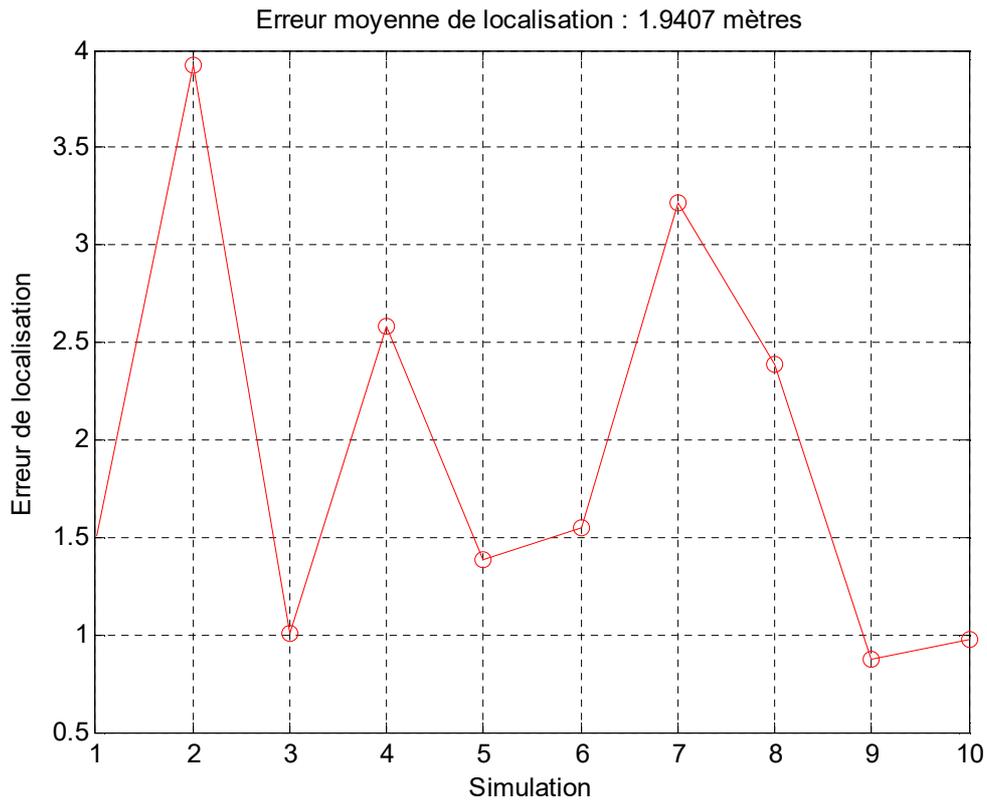


Figure IV.4 : Estimation de l'erreur de localisation par la méthode de trilatération.

On remarque bien que l'erreur de localisation varie à chaque simulation, cette variation est due à la variation du temps d'arrivée des signaux vers les trois capteurs, erreur moyenne de localisation calculée est de 2,1 mètres.

D'autre part nous avons simulé la même méthode afin de voir la variation de l'erreur pour chaque itération. Les figures IV.5 et IV.6 illustrent la position et l'erreur de chaque localisation respectivement. Ce principe utilise le plus souvent le système de signal radio. Il se base sur la connaissance de la vitesse de propagation de l'onde.

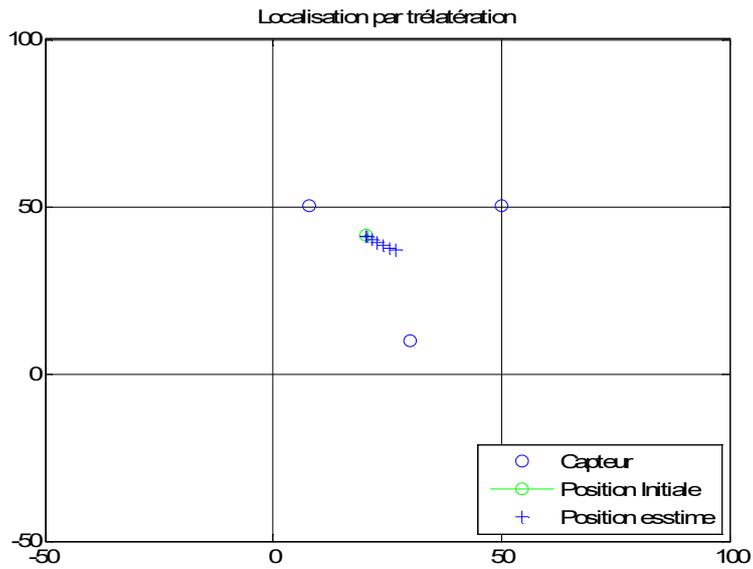


Figure IV.5 : Estimation de la position du mobile.

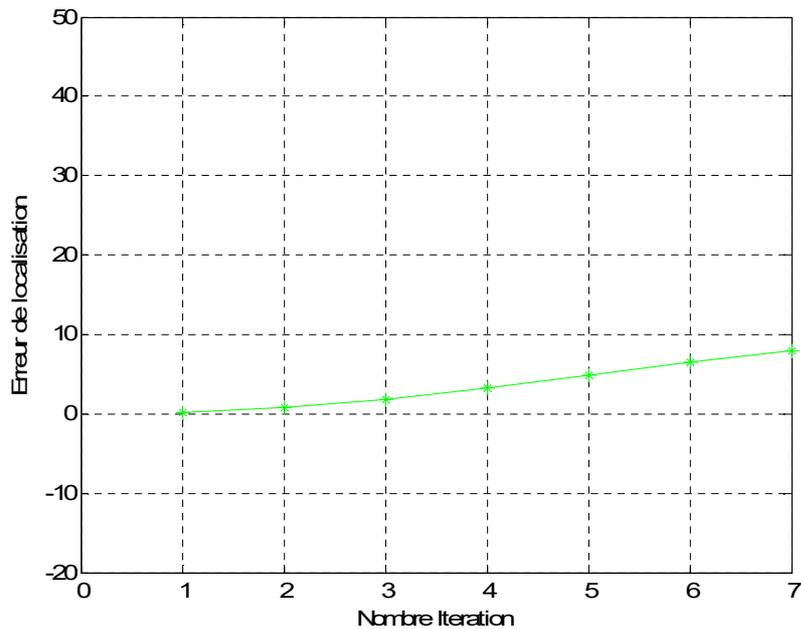


Figure IV.6 : Variation de l'erreur de localisation.

D'après les figures on constate, que cette technique n'est pas précise en termes de localisation, cela s'explique par la puissance limitée due au nombre réduit des capteurs déployés dans la surface ainsi qu'aux problèmes de synchronisation entre les capteurs.

IV.4 Localisation par Multilatération

Dans cette section, nous examinons la localisation d'un mobile en utilisant la Multilatération basée sur la TDOA. Nous considérons une surface de $100 \times 100 \text{ m}$ avec quatre capteurs déployés sur les positions suivantes $C1(0,100)$, $C2(0,0)$, $C3(100,0)$ et $C4(100,100)$. Les mobiles que nous souhaitons localiser sont distribués aléatoirement sur la surface d'étude. Le scénario avec un émetteur stationnaire est étudié pour analyser les performances d'un réseau de capteurs par rapport à une paire de capteurs stationnaire. La figure IV.7 montre la situation de mesure pour le réseau de capteurs à base de quatre capteurs fixes.

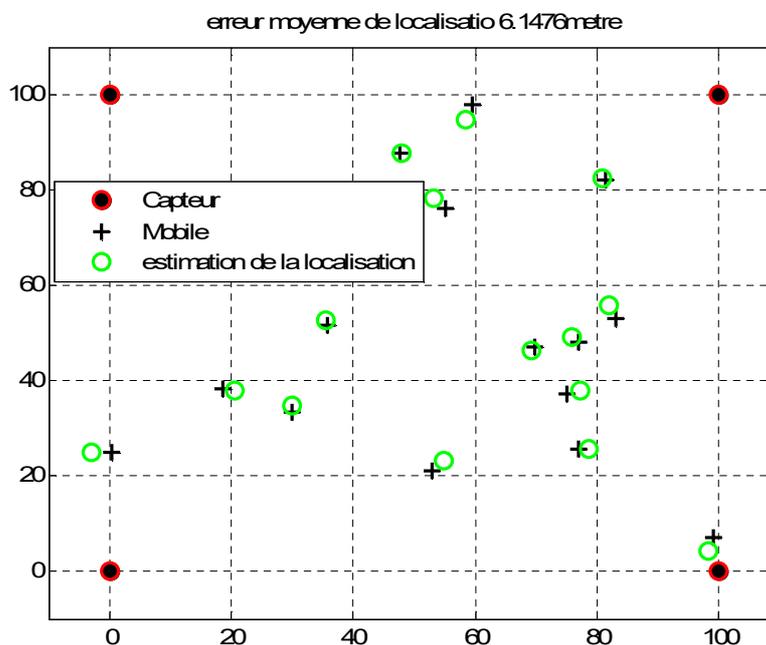


Figure IV.7 : Localisation par Multilatération.

Les résultats obtenus montrent la position réelle du mobile ainsi que la position estimée du mobile qui est représenté par un cercle vert. L'erreur moyenne de localisation dans une seule simulation est estimée à 6.1476 mètre.

Pour mieux évaluer l'erreur de localisation par la technique de Multilatération nous avons simulé plusieurs scénarios en faisant varier le nombre de mobiles, ce nombre est compris entre 20 et 60 mobiles avec un pas de 10 mobiles par simulation. Les résultats obtenus de la variation de l'erreur moyenne en fonction du nombre de mobiles est donnée dans la figure IV.8.

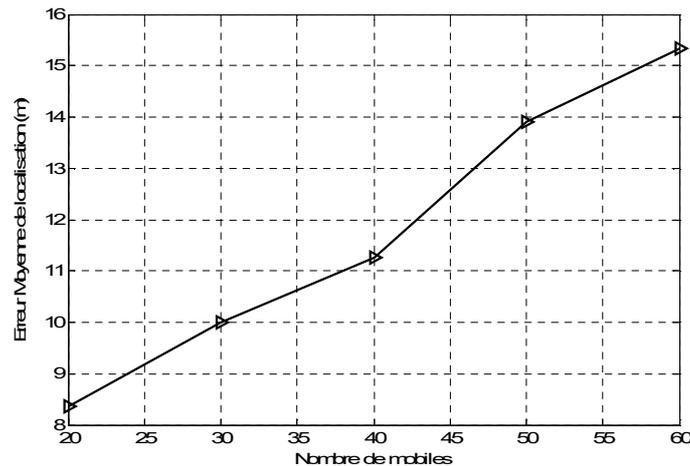


Figure IV.8 : Variation de l'erreur moyenne en fonction du nombre de mobile.

On remarque que plus le nombre de mobiles est élevé, plus la variation de l'erreur moyenne augmente. Cette erreur est due principalement à deux facteurs, le premier facteur est la non visibilité directe entre les capteurs et les mobiles causée par le voisinage des mobiles ce qui peut conduire à des erreurs de mesure des observables. Le second facteur est le problème de synchronisation entre les équipements, ce qui va mener à des retards importants.

IV.5 Localisation basé sur le calcul RSSI

RSSI est une mesure pour montrer la condition de la puissance reçue dans les nœuds capteurs et elle est utilisée dans la plupart des standards de communication sans fil. Théoriquement, RSSI est une fonction de la distance et est généralement affectée par l'environnement (et tout changement dans l'environnement). Dans la méthode RSSI, le nœud de capteur inconnu diffuse des trames à l'ensemble du réseau et des autres capteurs dans la zone de communication, puis la distance est calculée sur la base des valeurs RSSI reçues. En fait, la méthode RSSI trouve la distance basée sur la comparaison de la différence entre la puissance d'émission et la puissance reçue, appelée "perte de chemin" ou atténuation du signal. Dans le monde réel avec des environnements différents, l'augmentation de la perte de chemin est différente en raison de la distance différente. Dans notre cas nous considérons une surface de $100 \times 100m$ où 100 capteurs sont déployés suivant une loi uniforme. D'autre part 50 nœuds à localiser sont distribués aléatoirement nous désirons localiser ces mobiles et reconnaître l'erreur en utilisant la méthode du RSSI. Les résultats obtenus sont donnés dans les schémas suivants.

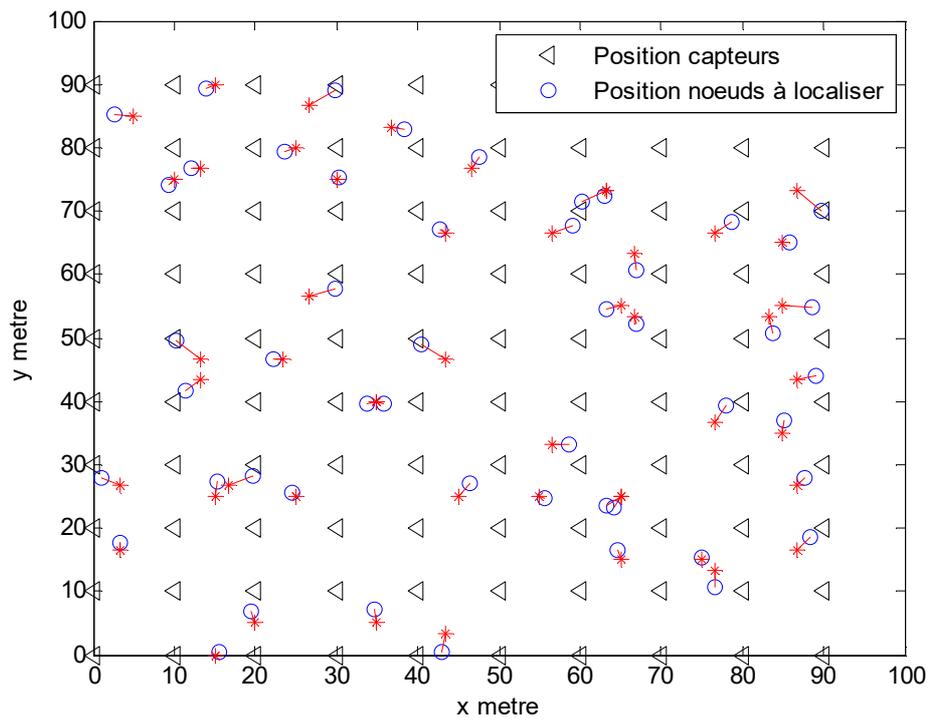


Figure IV.9 : Localisation par technique RSSI.

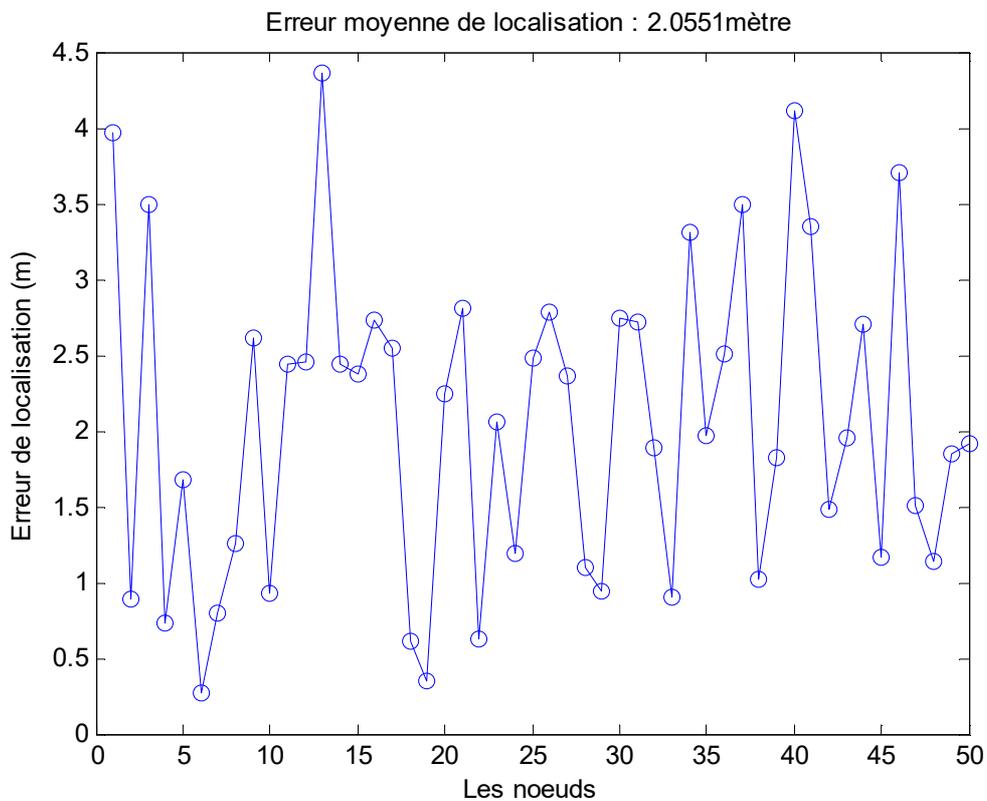


Figure IV.10 : Erreur de localisation par la méthode RSSI.

Les résultats montrent que les erreurs de positionnement diffèrent d'un mobile à un autre. On trouve que l'erreur moyenne de localisation est égale à 2,0551 mètres. En fait, la méthode RSSI trouve la distance basée sur la comparaison de la différence entre la puissance d'émission et la puissance reçue, appelée "perte de chemin" ou atténuation du signal. En effet, une onde radio diminue quand elle se déplace sur une certaine distance le signal est donc légèrement atténué.

IV.6 Localisation DV-hop

Avant de simuler l'algorithme de positionnement, la structure du réseau, le modèle de communication et les paramètres associés basés sur l'algorithme sont d'abord définis. Supposons qu'il y ait N nœuds de capteurs dans un réseau de capteurs sans fil bidimensionnels répartis aléatoirement dans une zone carrée sans obstacles ni interférences. Il existe un petit nombre de coordonnées de nœuds connues (positionnement GPS ou déploiement manuel) appelées ancres. D'autre part, nous supposons que le modèle de communication du nœud soit centré sur lui-même et que le rayon de communication soit noté $R=50$ m, la capacité de communication du nœud d'ancrage et du nœud inconnu sont identiques, les capacités d'émission et de réception Pareil. Nous Implémentons le nombre de sauts entre les nœuds. Processus de libération des informations non simulées : le conflit de temps et de communication entre les nœuds n'est pas pris en compte et il est supposé que le nœud inconnu et le nœud balise peuvent communiquer entre eux avec succès.

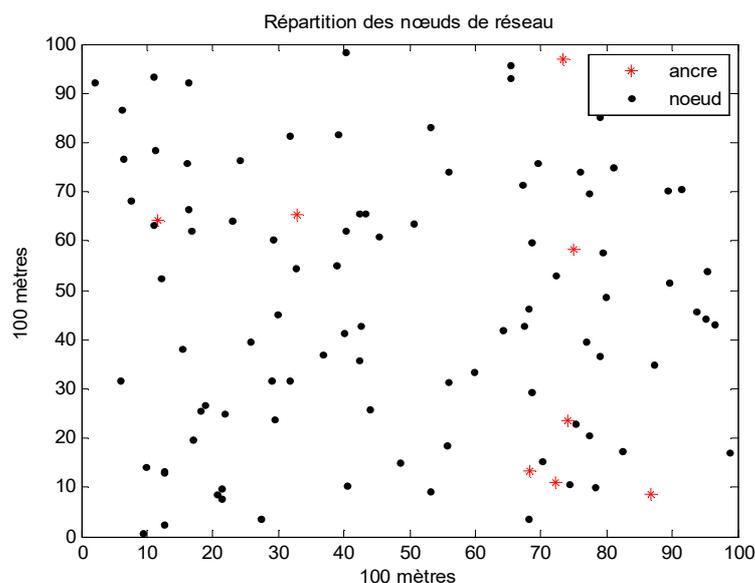


Figure IV.11 : Topologie du réseau.

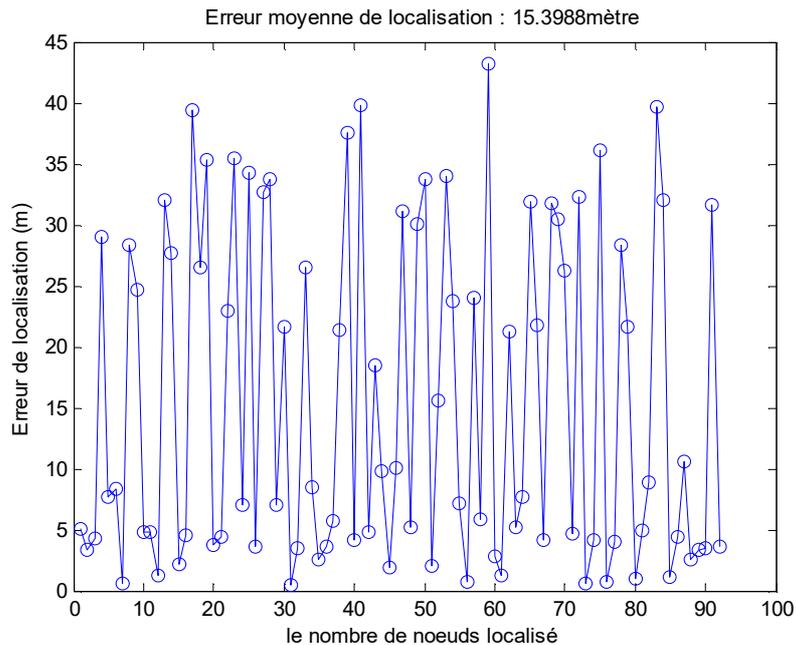


Figure IV.12 : Variation de l'erreur pour chaque nœud pour la méthode DV-Hop.

La distance inter-nœuds est graduée pour obtenir le nombre de sauts entre les nœuds et le nœud inconnu obtient une valeur de correction (moyenne de chaque distance) à partir du nœud de balise le plus proche. Utilisez ceci pour obtenir la distance estimée par le nombre de sauts. Cependant, le dernier saut sur le chemin d'une ancre à un nœud est généralement plus court que la portée radio, ce qui conduit à une légère surestimation de la distance nœud-ancre. Cet effet est plus prononcé pour les chemins courts, d'où l'augmentation de l'erreur. L'erreur maximale de localisation enregistrée est de 43 mètres avec une précision de 0.2471 mètres, l'erreur moyenne de localisation est égale à 15,3988 mètres.

On peut constater que des améliorations importantes dans la précision de positionnement et la couverture de localisation sont obtenues lors de l'utilisation du DV-Hop. On a re-simulé une deuxième fois mais en changeant la répartition des nœuds d'ancrage. Les résultats obtenus sont montrés dans les figures ci-dessous.

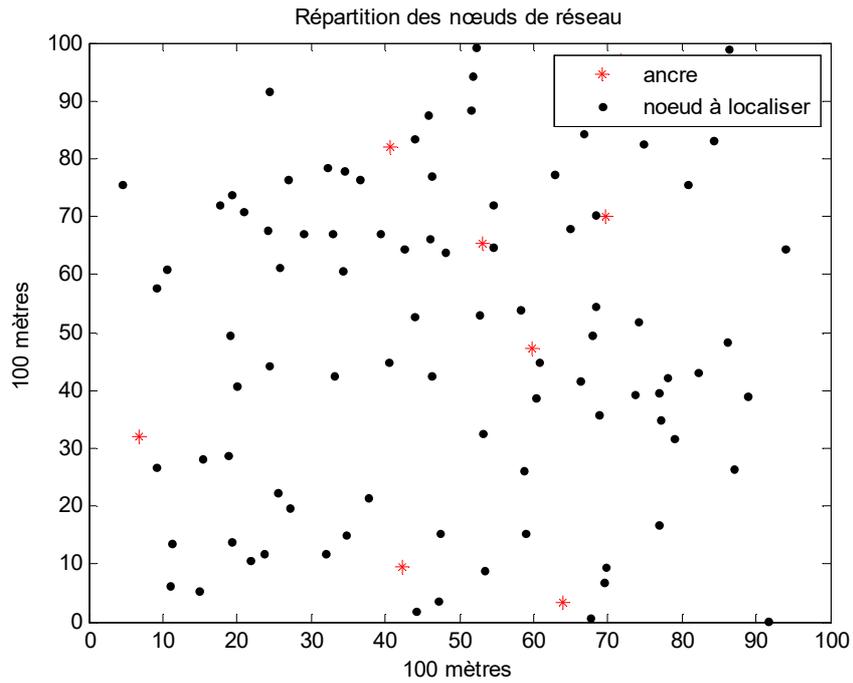


Figure IV.13 : Topologie du réseau selon la 2ème répartition pour DV-Hop.

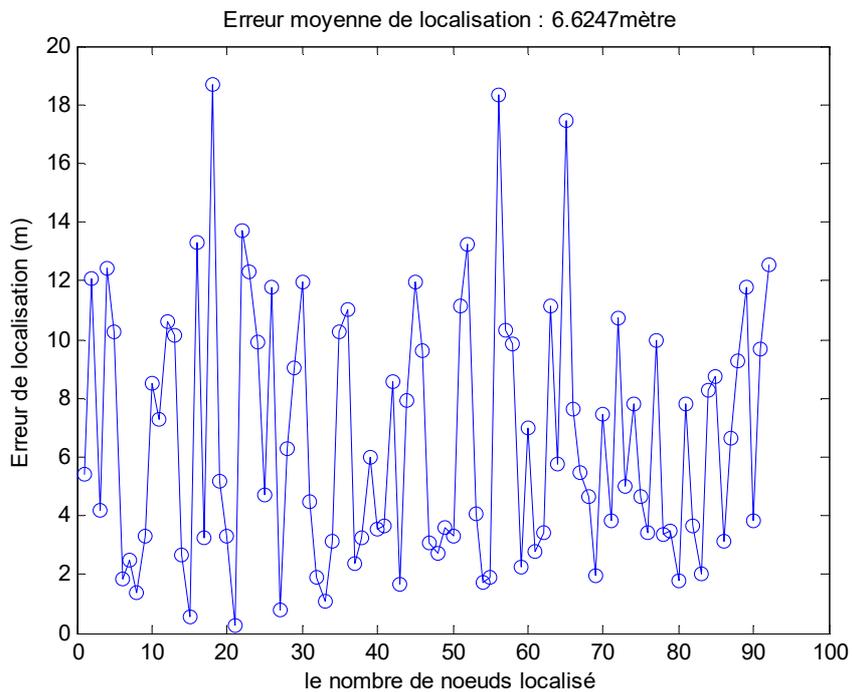


Figure IV.14 : Variation de l'erreur pour chaque nœud selon la 2ème répartition pour la méthode DV-Hop.

Les résultats de la seconde simulation montrent que plus les nœuds d'ancrages sont placés régulièrement, plus l'erreur est faible.

IV.7 Localisation par filtre de KALMAN étendu (EKF)

IV.7.1 Implémentation

L'implémentation du filtre EKF est détaillée dans cette partie ainsi nous montrons, les différentes équations d'obtention de la matrice Jacobéenne $H_i(K)$ de $\hat{D}_i(K)$.

- **Initialisation**

- ✓ Initialiser X_K (position initiale).
- ✓ P_K , (matrice de covariance de X).
- ✓ Q, (matrice de covariance de l'erreur sur le modèle d'état dû où déplacement).
- ✓ Initialiser R_0 , (matrice de variance de l'erreur sur le modèle de mesure).

Calcul des distances à l'entrée du filtre

- ✓ Calcul $\hat{D}_i(K)$

Pour le calcul des distances réelles séparant le mobile des capteurs, on s'est basé sur l'équation d'un cercle :

$$\hat{D}_i(K) = \sqrt{(x_K - x_i)^2 + (y_K - y_i)^2 + (z_K - z_i)^2} \quad (\text{IV.1})$$

Etant (x_K, y_K, z_K) sont les coordonnées de mobile à l'instant K et (x_i, y_i, z_i) sont les coordonnées des capteurs $i^{\text{ème}}$. Le tableau (IV.1) illustre les distances réelles obtenues entre le mobile et les capteurs :

Capteurs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\hat{D}_i(K)$	5,3896	4,7154	2,5539	6,4263	5,2435	2,7533	6,4305	3,0148	3,9953	6,0143

Tableau IV.1 : Distances réelles.

- ✓ Calcul des distances mesurées d'après le modèle Free-Space :

Pour le calcul des distances séparant le mobile des capteurs sans fil selon notre modèle Free-Space, on a appliqué l'équation :

$$\hat{d}_i(K) = \sqrt{\frac{P_t(i)C^2}{P_r(k)4\pi^2 F^2}} \quad (\text{IV.2})$$

CHAPITRE IV : Application des techniques de localisation

Etant $P_t(i)$ les puissances émis par les capteurs sans fil $i^{ème}$ et $P_r(k)$ les puissances reçues par notre mobile à l'instant K. Avant de commencer la simulation, nous calculons les distances entre les capteurs et le mobile en utilisant les paramètres suivants :

- ✓ Puissances émises par nos capteurs :

$$P_t(\text{mW}) = [10,38 \ 11,89 \ 11,35 \ 14,38 \ 13,35 \ 15,02 \ 10,35 \ 12,29 \ 13,58 \ 15,36]$$

- ✓ Puissances reçues par notre mobile :

$$P_r(\text{mW}) = [5,45 \ 5,45 \ 5,45 \ 5,45 \ 5,45 \ 5,45 \ 5,45 \ 5,45 \ 5,45 \ 5,45]$$

Le tableau IV.2 illustre les distances mesurées selon notre modèle entre le mobile et les capteurs :

Capteurs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\hat{d}_i(K)$	0,1177	0,1259	0,1230	0,1385	0,1334	0,1415	0,1175	0,1280	0,1346	0,1431

Tableau IV.2 : Distances mesurées d'après le modèle de propagation Free-Space.

- ✓ Calcul de la matrice Jacobéenne $H_i(K)$ se fait par la formule suivante [26] :

$$H_i(K) = \left[\frac{\partial \hat{D}_i(K)}{\partial x} \quad \frac{\partial \hat{D}_i(K)}{\partial y} \quad \frac{\partial \hat{D}_i(K)}{\partial z} \right] \quad (\text{IV.3})$$

$$\frac{\partial \hat{D}_i(K)}{\partial x} = \frac{(x_K - x_i)}{\sqrt{(x_K - x_i)^2 + (y_K - y_i)^2 + (z_K - z_i)^2}} \quad (\text{IV.4})$$

$$\frac{\partial \hat{D}_i(K)}{\partial y} = \frac{(y_K - y_i)}{\sqrt{(x_K - x_i)^2 + (y_K - y_i)^2 + (z_K - z_i)^2}} \quad (\text{IV.5})$$

$$\frac{\partial \hat{D}_i(K)}{\partial z} = \frac{(z_K - z_i)}{\sqrt{(x_K - x_i)^2 + (y_K - y_i)^2 + (z_K - z_i)^2}} \quad (\text{IV.6})$$

Déroulement du filtre de Kalman

- **Prédiction**

- ✓ Calcul de la matrice covariance d'erreur P_K en utilisant P initiale (P_0) et Q .

- **Mise à jour**

- ✓ $K_K = P_K * H_i^T * [P_K * H_i * H_i^T + R^T]^{-1}$ (IV.7)

- ✓ $\hat{x}_{K+1} = \hat{x}_K + K_K * (\hat{d}_i(K) - \hat{D}_i(K))$ (IV.8)

- ✓ $P_K = (P_K - H_K) * H_i * P_K$ (IV.9)

IV.7.2 Simulation et discussion des résultats:

Après plusieurs simulations préliminaires, le filtre de Kalman donne une meilleure estimation de la position du mobile en appliquant à l'entrée du filtre les paramètres suivants :

- ✓ $R_0 = 0$; (mesure exacte).
- ✓ $P = 10^{-25}$.
- ✓ $Q = 0$;(comme le mobile est en état statique, dans ce cas l'erreur de déplacement est nulle).

Dans cette section on présente les résultats obtenus pour la localisation par la méthode du filtre de Kalman (EKF). Dans notre simulation 10 capteurs ont été déployés dans une zone de $10 \times 10 \text{ m}$ de surface et un mobile au centre. La précision de localisation est un critère très important pour évaluer les algorithmes de localisation, une seule métrique a été retenue pour calculer l'erreur de localisation c'est l'écart spatial exprimé par la distance séparant la position réelles de mobile et la position estimée par le filtre de Kalman (EKF). Les figures IV.17 et IV.18 représentent les résultats obtenus après la simulation.

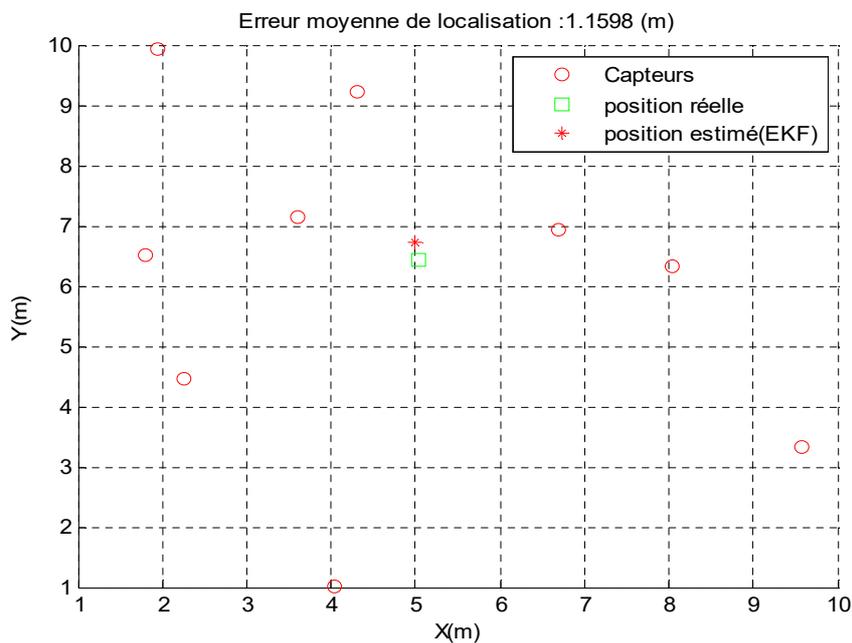


Figure IV.15 : Localisation par le filtre de Kalman étendu (EKF).

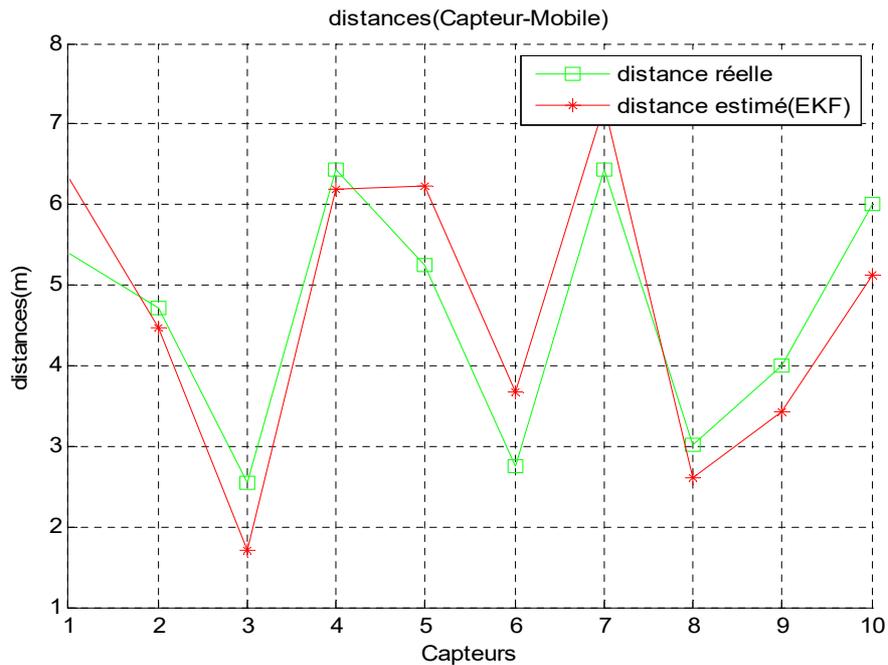


Figure IV.16 : Distances réelles et distances calculés par la méthode (EKF).

Les résultats obtenus montrent la position réelle du mobile ainsi que la position estimée par le filtre de Kalman qui est représenté par l'étoile rouge. L'erreur moyenne de localisation est estimée à 1,1598 m. Cette moyenne a été calculée en additionnant l'erreur d'estimation de positionnement du mobile de chaque capteur sur le nombre de capteurs (10 capteurs). On remarque que l'erreur d'estimation varie selon le rapport des puissances émises et reçues respectivement par le capteur et le mobile, plus la Puissance d'émission du signal est grande plus l'erreur d'estimation par le filtre est petite et vice versa, mais pas que ça, la valeur de la matrice de covariance d'erreur initial P influe tout autant.

IV.8 Comparaison entre les Techniques de Localisation

Le but de notre travail est d'arriver à trouver la meilleure technique de localisation d'un mobile où nœud pour les RCSF, pour y répondre à cette question on a comparé l'erreur moyenne de chaque technique : AOA (Tringulation), trilateration, Multilateration, RSSI, DV-Hop, Filtre de Kalman étendu (EKF). Le tableau ci-dessus résume l'erreur moyenne de chaque technique utilisé :

Techniques de localisation	Erreur moyenne de localisation (mètre)
Tringulation	1,9407
Multilateration	6,1476
RSSI	2,0551
DV-Hop	6,6247
Filtre de Kalman étendu(EKF)	1,1598

Tableau IV.3 : Comparaison entre les techniques de localisation.

IV.8.1 Discussion des résultats

D'après les résultats obtenus, on remarque que la plus part des méthodes étudiées nt des résultats satisfaisants notamment le RSSI, triangulation et le filtre de Kalman étendu (l'erreur est inferieure à 2 mètres), on voit que les valeurs trouvées sont proches les une au autres, mais il reste le filtre de kalman le meilleur qui donne la moyenne d'erreur la plus réduite.

IV.9 Le simulateur CupCarbon

Dans une autre étude, nous avons essayé de simuler un cas pratique de localisation en utilisant le simulateur CupCarbon

IV.9.1 Présentation générale du CupCarbon

CupCarbon est un simulateur de réseau de capteurs multi-agents basé sur la géo-localisation.il permet de concevoir et de simuler des réseaux sur une carte géographique de type *OpenStreetMap*. Pour se faire, CupCarbon fournit un ensemble d'objets facilement manipulables et configurables.

Le simulateur de l'environnement multi-agents permet de simuler des objets tels que les capteurs sans fils et les variations de leurs paramètres (exemple : les variations paramétriques de leur portée) et les déplacements d'un mobile (exemple : voiture, bus, etc).

L'objectif de ce simulateur est de permettre l'observation de l'opération de la détection et du routage dans un RCSF; et de sorte à se rapprocher le plus possible de la réalité.

IV.9.2 Simulation

Dans ce contexte nous avons considérés deux capteurs et deux stations réceptrices (Sink) qui stockent les informations correspondantes à la position adéquate du mobile tout au long du chemin en bleu comme l'illustre la figure (IV.17)

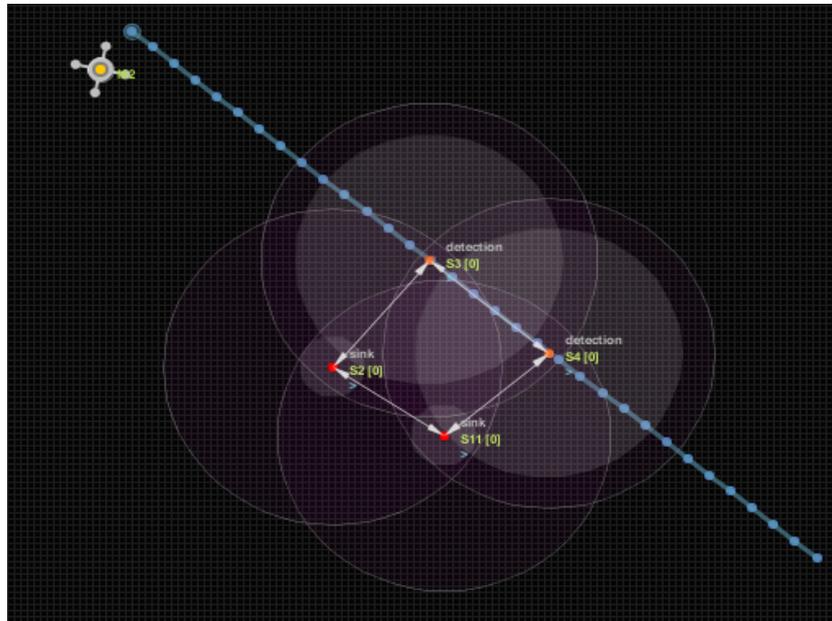


Figure IV.17 : Topologie du réseau.

Le principe est basé sur l'utilisation des puissances émises des capteurs, une fois le mobile se trouvant dans la zone de couverture du capteur, il reçoit le signal comme le montre la figure (IV.18)

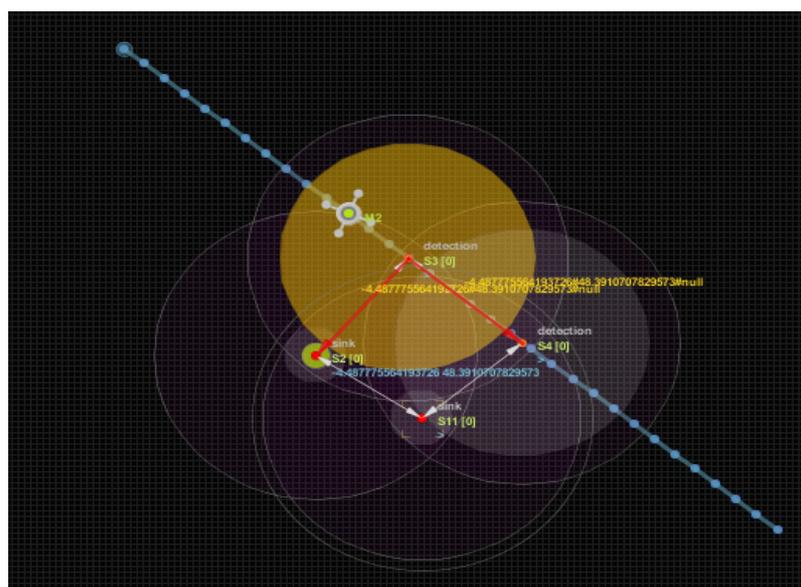


Figure IV.18 : Détection de mobile par le 1er capteur.

CHAPITRE IV : Application des techniques de localisation

La position a été estimée par le capteur en utilisant la technique RSSI, ensuite le capteur va jouer le rôle d'un routeur pour envoyer l'information à la station de base (sink) qui sera allumée comme preuve de réception des positions.

Dans la figure (IV.19) , nous remarquons que le mobile entre dans la zone de chevauchement (*OverLap*) qui sera par la suite localisé par les deux capteurs S3,S4 qui vont ensuite envoyer l'information aux deux sink respectivement S2 et S1, cependant il y a un problème d'interférences entre les deux nœuds.

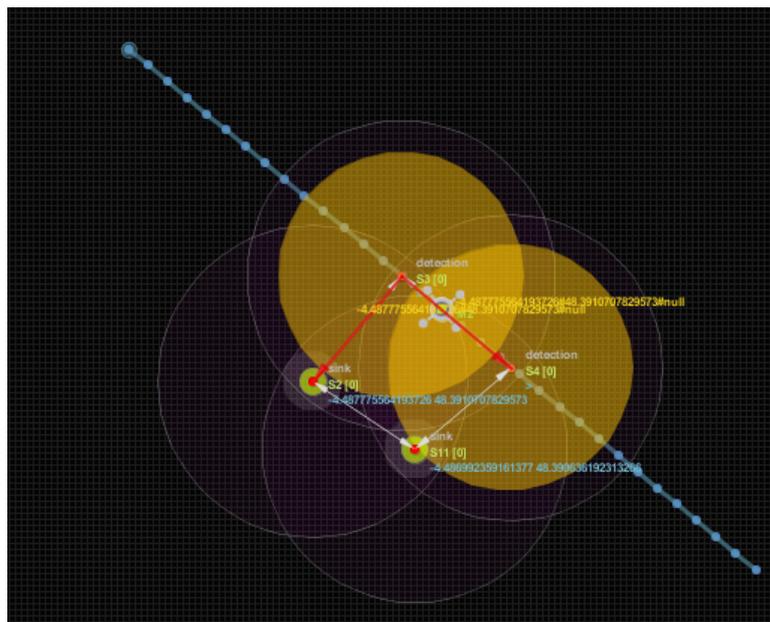


Figure IV.19 : Détection du mobile par les 2 capteurs (zone de chevauchement).

Une fois le mobile sort de la zone *OverLap* il sera détecté que par l'autre capteur S4 dont il couvre sa zone puis envoie à la seconde station de base qui s'allume à son tour. Comme nous pouvons le constater dans la figure IV.20.

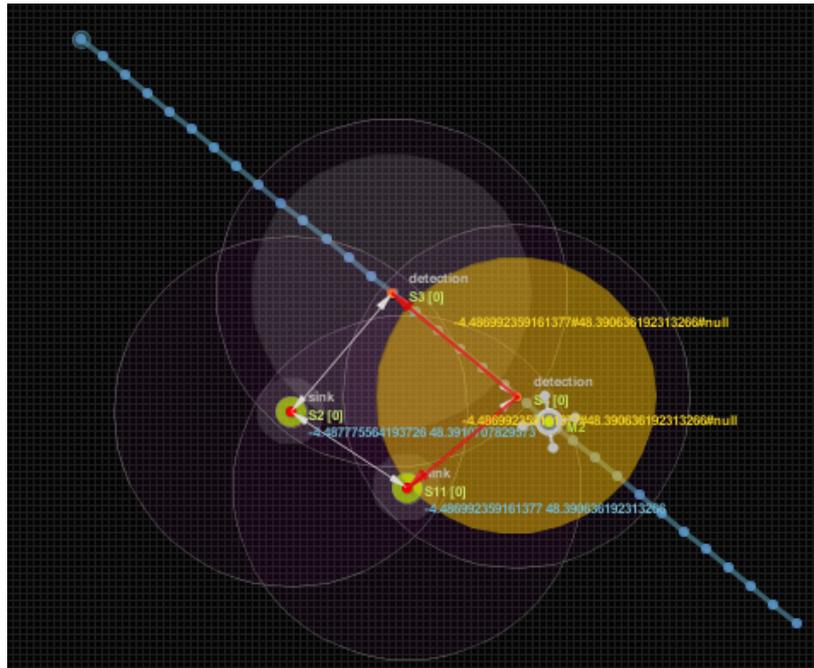


Figure IV.20 : Détection du mobile par le 2ème capteur.

IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé les différentes méthodes de localisation étudiées dans un réseau de capteurs sans fils sous MATLAB, afin de nous permettre de voir la meilleure méthode.

Après avoir réalisé la simulation, nous avons pu comparer les résultats obtenus. Ces derniers nous ont montré que le filtre de Kalman étendu EKF donne de meilleurs résultats par rapport aux autres techniques en terme d'erreur moyenne de l'estimation.

D'autre part nous avons opté pour le CupCarbon, un logiciel qui nous a permis de visualiser les opérations de localisation et du routage.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale et Perspectives

Le travail consigné dans ce projet a été le fruit d'une étude menée dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil, ce qui nous a permis de découvrir les propriétés de ces derniers, leurs contraintes et les domaines variés qui les utilisent. Nous nous sommes intéressés principalement à la problématique de la localisation en étudiant les différentes techniques permettant de localiser un nœud.

Pour répondre à notre problématique, nous avons appliqué les techniques d'estimation: Trilatération, Multilatération et Triangulation. Les techniques citées sont basées sur les techniques de mesures de la distance séparant le capteur du mobile en s'appuyant sur des paramètres de : puissance reçue pour le RSSI, temps d'arrivée pour TOA, angle d'arrivée pour AOA, différence des temps d'arrivée pour TDOA et le nombre de sauts pour le DV-Hop. Ensuite nous avons procédé à l'implémentation du filtre de Kalman étendu (EKF). Après l'évaluation et l'interprétation des résultats obtenus des techniques étudiées, nous avons pu déduire que le filtre de Kalman étendu est plus performant que les autres méthodes en terme de précision et d'erreur moyenne. Pour visualiser les opérations de détection et routage par un réseau de capteurs sans fils, nous avons mis en œuvre une application sous le simulateur CupCarbon.

Notre travail a été très bénéfique tant sur le plan personnel que sur le plan professionnel. Nous avons saisi cette opportunité pour acquérir de nouvelles connaissances sur la localisation d'un mobile dans les réseaux de capteurs sans fil.

Comme perspective, il serait très intéressant de se baser sur les méthodes étudiées afin de pouvoir localiser un mobile dans un état dynamique dans un réseau de capteurs sans fil. d'autre part, il est important d'étudier une localisation à double mobilité c'est-à-dire mobilité des capteurs et mobilité des nœuds à détecter. de plus, dans notre cas le milieu est considéré homogène d'où l'importance de l'étude dans un milieu avec présence de bruit (interférence).

Bibliographie

- [1] Q. Lampin, « Réseaux urbains de capteurs sans-fil : Applications, caractérisation et protocoles ». Thèse de doctorat, Projet INRIA Urbanet, Laboratoire CITI, INSA de Lyon France, Janvier 2014.
- [2] Y. Leborgne. G. Bontempi. « Réseaux de senseurs sans fil : problèmes de localisation ». Université, Bruxelles, 2007.
- [3] Bendimerad Nawel. « Système de surveillance d'infrastructure publique à l'aide des réseaux de capteurs sans fil ». Thèse doctorat, Université d'Oran 1, 2015.
- [4] Tibor István Nagy and József Tick. « Intelligent sensor networks in the military and civil sectors ». In 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, SACI 2009, Timisoara, Romania, May 28-29, 2009, pages 471–474. IEEE, 2009.
- [5] M. Yasser ROMDHANE. « Evaluation des performances des protocoles S-MAC et Directed Diffusion dans les réseaux de capteurs ». Projet De Fin d'Etudes, école supérieure de communication de Tunis, 2007.
- [6] Gallais, Antoine. « Ordonnement d'activité dans les réseaux de capteurs : l'exemple de la couverture de surface ». Université des sciences et technologies de Lille. Rapport de thèse, 2007.
- [7] Jamal N, Al-Karati, Ahmed E. Kamal. « Routing Techniques in wireless sensor network : A survey ». Dept. Of Electrical and Computing Engineering, Université Ames, USA, 2014.
- [8] Lyes Khelladi, Nadjib Badach. « Les réseaux de capteurs : état de l'art ». Rapport de recherche. Université U.S.T.H.B, Algérie, Février 2004.
- [9] Yaser Yousef. « Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil ». Thèse de Doctorat Spécialité informatique, université de haute alsace, 2010
- [10] B. krishnamachari, D. Estrin, and S. Wicker. « Modelling data-centric routing in wireless sensor networks », Proceedings of the IEEE INFOCOM, 2002.
- [11] P. Rawat, K. D. Singh, H. Chaouchi, J. M. Bonnin, « Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies », The Journal of Super computing, Vol. 68, Issue 1, pp. 1-48, Avril 2014.

Bibliographie

- [12] M. Benazzouz. « Surveillance de tout point d'une zone d'intérêt à l'aide d'un réseau de capteur multimédia sans fil ». Rapport de recherche. Ecole nationale supérieure d'informatique, Oued-Smar, Algérie, 2013.
- [13] D. Curiac, V. Constantin, P. Dan, J. Lucian and D. Alexa. « Redundancy and Its Applications in Wireless Sensor Networks: A Survey ». WSEAS Transactions on Computers, Vol. 8, Issue 4, pp. 705-714, 2009.
- [14] Ryota Yamasaki, Atsushi Ogino, Tsuyoshi Tamaki, Takaki Uta, Naoto Matsuzawa, and Takeshi Kato. « TDOA location system for ieee 802.11 b wlan ». In Proceedings of the IEEE Conference on Wireless Communications and Networking, 2005, vol. 4, pp. 2338–2343.
- [15] Kutluyil Dogancay and DA Gray. « Bias compensation for least-squares multipulse TDOA localization algorithms ». In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, 2005, pp. 51–56.
- [16] Ossi Kaltiokallio, Maurizio Bocca, and Lasse M Eriksson. « Distributed rssi processing for intrusion detection in indoor environments ». In Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. ACM, 2010, pp. 404–405.
- [17] Van der Haegen Mathieu. « Réseaux de sensors sans fil : problème de localisation », Thèse doctorat, Université libre de Bruxelles, France, 2007.
- [18] Mohamed A.Abid. « Systèmes de localisation en temps réel basés sur les réseaux de communication sans fil ». Thèse doctorat. Université de Sherbrooke, Canada, Janvier 2016.
- [19] Jinze Du. « Indoor localisation techniques for wireless sensor network ». Electronic. Universite de Nantes, France, 2018.
- [20] Dalce Réjane. « Méthodes de localisation par le signal de communication dans les réseaux de capteurs sans fil en intérieure ». Thèse doctorat. Université de Toulouse, France, Juin 2013.
- [21] B. KARP et H. T. KUNG. « GPSR : Greedy perimeter stateless routing for wireless sensor networks ». In : Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). Boston, USA, août 2000, p. 243 –254.

Bibliographie

- [22] K. HEURTEFEUX et F. VALOIS. « Is RSSI a Good Choice for Localization in Wireless Sensor Network? » In : Proceedings of 26th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Fukuoka, Japan, mar. 2012, p. 732 –739.
- [23] Patrick Oliver Kamgueu. « Configuration dynamique et routage pour l'internet des objets ». Réseaux et télécommunications. Université de Lorraine, France, 2017. Français.
- [24] Site internet : <http://www.ferdinondpiette.com/bloq/20011/04/le-filtre-de-Kalmen-de-lestimateur-optimal-filtre-deKalman/>.
- [25] JUWELCH .G et BISHOP.G « An Introduction to the Kalman Filter ». Department of the Computer Science. University of North Carolina at Chapel Hill, États-Unis, 2006.
- [26] Zendaji Sylia. « Localisation d'un terminal mobile à l'état dynamique basé sur le filtre de Kalman ». Université Abderrahman MIRA – Bejaia, Algérie, 2014.
- [27] A.SHAREEF .Y. ZHU. « Localization using Extended Kalman Filters in wireless sensor Networks». Source: Kalman Filter: Recent Advances and Applications, Book edited by: Victor M. Moreno and Alberto Pigazo, ISBN 978-953-307-000-1, pp. 584, April 2009, ITech, Vienna, Austria

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fils soulèvent plusieurs problématiques de recherche notamment celle de la localisation. Ce mémoire s'inscrit dans ce cadre là, il aborde les procédures complètes de localisation, y compris les techniques de l'estimation des distances (TOA, TDOA, RSSI, DV-HOP) et les angles (AOA) inter nœuds, et comment les capteurs calculent la position des nœuds à l'aide de la Triangulation, Trilatération et la Multilatération. Pour enrichir ce contexte le filtre de Kalman étendu a été étudié et implémenté. Les résultats de ce travail nous ont permis d'évaluer et de comparer entre toutes ces méthodes.

Mots-clefs : Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF), localisations, routage, filtre de Kalman.

Abstract

Wireless sensor networks raises several research issues, namely localization. This paper is part of this framework, it deals with the complete procedures of localization, including techniques of distance estimation (TOA, TDOA, RSSI, DV-HOP) and angles (AOA) between nodes, and how the sensors calculate the position of the nodes using triangulation, Trilateration and Multilateration. else, to enrich this context the extended Kalman filter has been studied and implemented. The results of this work allowed us to evaluate and compare between all these methods.

Key-words : Wireless Sensor Networks (WSNs), localization, routing, Kalman filter.