

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderahmane Mira de Béjaïa

Faculté des Sciences Exactes

Département de Recherche opérationnelle



Mémoire de Master

en recherche opérationnelle

Option

Modélisation Mathématique et Évaluation des Performances des Réseaux

Thème

**Amélioration et simulation de la méthode de localisation
MinMax dans les WSNs**

Réalisé par :

M^{elle} OUZZANE Samiha

M^{elle} CHAHBOUNE Sabrina

Soutenu devant le Jury composé de :

Président : M^r KABYLE K .

Examineur : M^{me} BENSALAH Z.

Encadreur : M^r ACHROUFENE A.

Promotion 2017/2018

Remerciements

Tout travail de recherche n'est jamais totalement l'oeuvre d'une seule personne. Á cet effet, nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance et nos vifs remerciements à tous ce qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail en l'occurrence nos familles qui n'ont jamais cessé de nous encourager. Merci à Dieu de nous avoir donné la force et le courage de tenir jusqu'à la fin de ce travail.

Merci à tous ceux qui ont contribué à ce que la réalisation de ce projet soit possible.

Nous tenons à remercier vivement Mr **ACHROUFENE** Achour, pour nous avoir honoré par son encadrement, pour sa disponibilité, ses orientations, ses précieux conseils et ses encouragements qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner et de porter leur jugement sur ce modeste travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à nos famille : parents, frères, sœurs de nous avoir aidé à surmonter tous les obstacles et é nous forger à travers les difficultés vécues durant toute cette période de travail et qui nous ont toujours supportées moralement et financièrement pendant toutes nos longues années d'étude.

Nous n'oublieront pas aussi nos proches amis qui nous ont vivement soutenues et encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire et nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près comme de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents,
À ma famille et en particulier mes frères Nazim et Samy,
À mes petits neveux adorés "Djana et Houssin" pour m'avoir fait partager leur joie de
vivre et m'avoir ainsi soutenu dans mes efforts,
À mon mari Nasreddine et sa famille,
À toute ma famille,
À mes amies et collègues, et tous ceux qui m'ont aidé,
À tous mes professeurs ainsi que tous mes meilleurs amis et en particulier Dounia,
Nahla, Amel, Fairouz, Nedjema, Massilya, Ibtissam pour leurs éternel soutien et la
confiance qu'ils ont en mes capacités,
À ma binôme Sabrina avec qui j'ai partagé de belles années d'études et sa famille.

OUZZANE Samiha

Dédicaces

C'est grâce à Allah seul qu'on a pu réaliser ce travail. *Je le dédie :*

À Ma très chère mère, qui a toujours été présente pour moi, et qui sans cesse veille sur moi avec ses prières, pour ses grands sacrifices et tout l'amour qu'elle me porte,

À Mon très cher père, pour tous ses conseils et pour toute la confiance qu'il a mise en moi et pour son dévouement pour mon bonheur,

À Ma chère grande mère,

À Mon cher grand père,

Que dieu me les garde

À Ma chère sœur adorable Sarah,

À Mes chers frères : Sofiane, Rafik et Oualid,

À Mes tentes, et oncles,

À Toute la famille : Chahboune et Bounegab,

À Tous mes amis(es), plus particulièrement Cylia, Karima, Zineb, Seyf, Dihia,

À Ma binôme OUZZANE Samiha et toute sa famille,

À Toute la promotion de FEPR chacun par son nom.

CHAHBOUNE Sabrina

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ADC	Analog Digital Converter
RCSF	Reseau de Capteurs Sans Fil
GPS	Global Positioning System
RSSI	Received Signal Strength Indicator
ToA	Time of Arrival
TDoA	Time Difference of Arrival
AoA	Angle of Arrival
RFID	Radio Frequency IDentification
UWB	Ultra Wide Band
DVHop	Distance vector-Hop

TABLE DES MATIÈRES

Liste des abréviations	i
Table des Matières	ii
Liste des tableaux	v
Table des figures	vi
Introduction Générale	1
1 Réseaux de capteurs sans fil	3
1.1 Introduction	3
1.2 Nœud capteur sans fil	3
1.2.1 Qu'est-ce qu'un capteur ?	3
1.2.2 Architecture d'un nœud capteur sans fil	4
1.2.2.1 Architecture matérielle	4
1.2.3 Architecture logicielle	5
1.3 Réseaux de capteurs sans fil	5
1.3.1 Description des réseaux de capteurs sans fil	5
1.3.2 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil	6
1.3.3 Différentes topologies des RCSF	7
1.3.4 Système d'exploitation pour les RCSFs	9
1.3.5 Principales caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil	10
1.3.6 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil	11
1.3.6.1 Applications environnementales	11
1.3.6.2 Applications militaires	11
1.3.6.3 Applications domotiques	11

1.3.6.4	Applications médicales	12
1.3.6.5	Applications à la sécurité	12
1.3.6.6	Applications agricoles	12
1.4	Conclusion	13
2	Systèmes de localisation dans les réseaux de capteurs sans fils	14
2.1	Introduction	14
2.2	Importance de la localisation	15
2.3	Localisation dans les RCSFs	15
2.4	Composition d'un système de localisation	16
2.4.1	Estimation de distance/angle	17
2.4.2	Calcul de position	22
2.5	Méthodes de localisation	26
2.5.1	Méthodes Range-free	26
2.5.1.1	DV-HOP	26
2.5.2	Méthodes Range-based	27
2.5.2.1	SumDistMinMax	27
2.5.2.2	DV-Distance	28
2.5.2.3	DV-Euclidean	28
2.5.3	Forme d'implémentation	29
2.5.3.1	Méthodes centralisées	29
2.5.3.2	Méthodes distribuées	29
2.6	Les technologies de signaux utilisés dans la localisation	30
2.6.1	Infrarouges	30
2.6.2	(Ultra) sons	30
2.6.3	Radio frequency	31
2.6.3.1	GPS : Global positioning system	31
2.6.3.2	RFID : Radio Frequency Identification	31
2.6.3.3	RF-UWB : Ultra Wide Band	31
2.6.3.4	WiFi	32
2.6.3.5	Protocole ZigBee	32
2.6.3.6	Bluetooth	32
2.7	Conclusion	33
3	Amélioration de la méthode MinMax	34
3.1	Introduction	34
3.2	Problématique	34

3.3	Objectifs de notre travail	35
3.4	Système de localisation proposé	35
3.5	Étude comparative des deux méthodes MinMax et Centroïde	36
3.6	Étude de la méthode MinMax	39
3.6.1	Évaluation des résultats	41
3.6.2	Améliorations de la méthode MinMax	41
3.7	conclusion	45
4	implémentation et simulation	46
4.1	Introduction	46
4.2	Outils d'implémentation et de simulation	46
4.2.1	Choix de ContikiOS	46
4.2.2	Simulateur Cooja	47
4.2.3	Interface de développement	49
4.3	Simulation	49
4.3.1	Scénario de simulation	49
4.4	Implémentation des méthodes	49
4.4.1	Calcul de la distance en fonction de RSSI	50
4.4.2	Pseudo-code de la méthode MinMax	50
4.4.3	Pseudo-code de la méthode Centroïde	52
4.4.4	Algorithmes des programmes à mettre dans les nœuds	53
4.4.5	Tests de simulation	55
4.5	Réalisation des tests	56
4.5.1	Réalisation des tests avec MinMax et MinMax modifié	58
4.6	Conclusion	64
	Conclusion Générale et Perspectives	65
	Bibliographie	67

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Comparaison des méthodes d'estimation des distances/angles	21
2.2	Les principales caractéristiques des méthodes de calcul de position.	26
2.3	Les technologies de localisation.	33
4.5	les résultats de simulation avec la méthode MinMax	59
4.6	les résultats de simulation avec la méthode MinMax modifié	60

TABLE DES FIGURES

1.1	Nœud capteur Mica [2]	4
1.2	Architecture d'un nœud capteur [1]	4
1.3	Architecture d'un RCSF	6
1.4	Topologie en étoile	7
1.5	Topologie maillée	8
1.6	Topologie cluster-tree	9
1.7	Quelques domaines d'application des RCSF	12
2.1	Composition d'un système de localisation	16
2.2	Principe du ToA	19
2.3	Principe du TDoA	20
2.4	Principe de AOA	21
2.5	Trilatération	22
2.6	Principe de la triangulation	23
2.7	Principe de MinMax	24
2.8	Principe de Centroïde	25
2.9	Algorithme SumDistMinMax	27
2.10	Algorithme DV-Distance	28
2.11	Algorithme DV-Euclidean	29
3.1	Comparaison d'erreur de précision entre Controïde et MinMax pour dix capteurs.	36
3.2	Comparaison d'erreur de précision entre Controïde et MinMax en fonction du nombre d'ancre.	37
3.3	Comparaison de consommation de l'énergie entre MinMax et centroïde.	38
3.4	Architecture du réseau : le nœud mobile à l'intérieur des nœud ancrés.	40
3.5	Architecture du réseau : le nœud mobile à l'extérieur des nœuds ancrés.	40

3.6	Comparaison de l'erreur de localisation entre les deux cas.	41
3.7	Principe de la proposition d'amélioration.	42
4.1	Interface graphique du simulateur Cooja	48
4.2	La suite des messages reçu par le mobile	55
4.3	comparaison d'erreur de précision obtenu avec MinMax et MinMax modifié : le nœud mobile est à l'intérieur des ancrs	57
4.4	comparaison d'erreur de précision obtenu avec MinMax et MinMax modifié : le nœud mobile est à l'extérieur des ancrs	57
4.5	Différence d'erreur de précision de localisation avant et après l'amélioration avec MinMax pour trois capteur.	60
4.6	Différence d'erreur de précision de localisation avant et après l'amélioration avec MinMax pour cinq capteur.	61
4.7	Différence d'erreur de précision de localisation avant et après l'amélioration avec MinMax pour dix capteur.	62
4.8	Différence d'erreur de précision de localisation avant et après l'amélioration avec MinMax pour vingt capteur.	62
4.9	Différence des taux d'erreur avant et après l'amélioration avec MinMax pour trente capteur.	63
4.10	Comparaison de la consommation d'énergie entre MinMax et MinMax améliorée.	64

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis quelques décennies, le besoin d'observer et de contrôler des phénomènes physiques tels que la température, la pression ou encore la luminosité est devenu essentiel pour de nombreuses applications industrielles et scientifiques. Il n'y a pas si longtemps, la seule solution pour acheminer les données du capteur jusqu'au contrôleur central, était le câblage qui avait comme principaux défauts d'être coûteux et encombrant.

La convergence des progrès réalisés d'une part dans le domaine de la microélectronique et d'autre part dans les technologies de communication sans fil a permis de concevoir de petits dispositifs, peu coûteux, de faible puissance, appelés nœuds capteurs. Ces petites entités électroniques ont pour objectif la collecte d'un ensemble de paramètres de l'environnement entourant les nœuds afin de les acheminer vers des points de traitement, et ils ont la capacité de s'auto-organiser pour former un réseau de capteurs sans fil (RCSF).

Le but final d'un RCSF est de surveiller une zone d'intérêt, mais pour y parvenir plusieurs contraintes doivent être atteintes telles que : la synchronisation entre nœuds, la localisation, la gestion de la topologie, l'agrégation des données, le stockage de données, etc.

La localisation des nœuds est l'un des services les plus importants. Elle consiste à associer à chaque nœud les coordonnées de sa position. De nombreuses applications reposent sur la connaissance de l'emplacement des nœuds capteurs. Dans ce type d'applications un événement détecté par un capteur n'est utile que si une information relative à sa localisation géographique est fournie. C'est parce que les utilisateurs ont souvent besoin de savoir non seulement ce qui se passe, mais aussi où les événements intéressés se produisent ou où la cible est. Pour ce faire, plusieurs techniques de localisation dans les RCSFs sont utilisées pour estimer l'emplacement des capteurs. En effet, le défi de la localisation est d'estimer de manière fiable les positions des nœuds mobiles avec le minimum de ressources puisque

les nœuds capteurs possèdent généralement des ressources très limitées. Par conséquent, un algorithme de localisation doit être simple et non complexe et son développement n'exige pas de grands calculs ni de grande capacité de stockage en mémoire. En prenant en compte toutes ces considérations, nous pouvons constater que ce n'est pas toutes les méthodes de localisation qui peuvent être utilisées dans les réseaux de capteurs sans fil d'une manière distribuée.

Dans ce travail, nous allons proposer un système de localisation qui utilise la technologie Zigbee pour la communication et la puissance du signal reçu pour l'estimation de la distance entre deux nœuds, ainsi que les méthodes de localisation MinMax et Centroïde pour calculer la position du nœud inconnu. Afin d'implémenter et de valider le système proposé, nous utilisons le système d'exploitation Contiki dédié aux réseaux de capteurs et le simulateur Cooja intégré à celui-ci. La suite de ce document s'articule de la façon suivante :

Le premier chapitre décrit les caractéristiques générales des nœuds capteurs et des réseaux de capteurs sans fil et leurs architectures, leurs systèmes d'exploitation ainsi que leurs domaines d'application.

Le second chapitre expose les objectifs de la localisation puis définit le système de localisation, les technologies de mesure et les méthodes de calcul de position utilisées pour la localisation. Le chapitre se termine par la description des algorithmes de localisation.

Le troisième chapitre dans ce chapitre nous présentons l'objectif de notre travail, notre problématique de précision de localisation, le système de localisation proposé, ensuite nous étudions la méthode MinMax et on propose une amélioration pour cette dernière.

Le quatrième chapitre sera consacré pour l'implémentation et la simulation de notre proposition. Nous donnons d'abord un aperçu de la plateforme ContikiOS dédié aux réseaux de capteurs sans fil, suivi d'une brève présentation de l'environnement de simulation Cooja. Nous allons décrire par la suite, les différents scénarios de simulation effectués. À la fin de ce chapitre nous discutons et nous comparons les différents résultats de simulation obtenus avec la méthode MinMax et son amélioration.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion qui résume l'essentiel de notre travail.

CHAPITRE 1

RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

1.1 Introduction

L'essor des technologies électroniques et de la communication sans fil, ont permet de concevoir de petits dispositifs, peu couteux, de faible puissance, appelé nœuds capteurs. Ces derniers permettent d'acquérir des données sur leur environnement immédiat, de les traiter et de les communiquer, et ils ont la capacité de s'auto-organiser pour former un réseau de capteurs sans fil (RCSF).

Dans ce chapitre nous allons décrire les caractéristiques générales des noeuds et des réseaux de capteurs sans fil et leurs architectures, à l'égard des propriétés des RCSFs, leurs système d'exploitation ainsi que leurs domaines d'application. Finalement, ce chapitre s'achève par une conclusion.

1.2 Nœud capteur sans fil

1.2.1 Qu'est-ce qu'un capteur ?

Les capteurs sont des dispositifs de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées, autonomes, capable de capter, collecter et traiter des informations et de les transmettre, via les ondes radio, à une autre entité (capteurs, unité de traitements, ...) sur une distance limitée à quelques mètres[1]. La figure 1.1 montre un exemple d'un capteur [2].



FIGURE 1.1 – Nœud capteur Mica [2]

1.2.2 Architecture d'un nœud capteur sans fil

On distingue deux types d'architecture d'un nœud capteur sans fil : architecture matérielle et architecture logicielle.

1.2.2.1 Architecture matérielle

Un nœud capteur est composé de quatre unités de base (unité d'acquisition, unité de traitement, un module de communication et une batterie) et deux unités optionnelles (le mobilisateur et le système de localisation).

Le schéma de la figure 1.2 illustre l'architecture matérielle d'un nœud capteur :

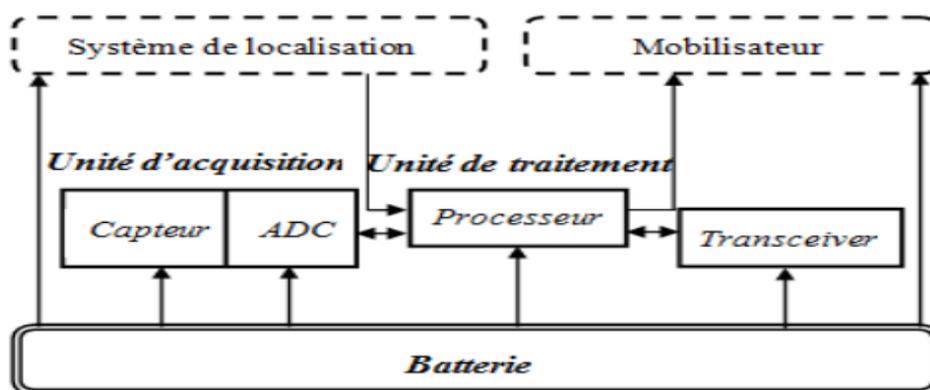


FIGURE 1.2 – Architecture d'un nœud capteur [1]

- ✓ **Unité d'acquisition** : Elle est généralement composée de deux sous-unités qui sont les captures qui prélèvent l'information de l'environnement et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC (Analog to Digital Convertir) qui va convertir l'information

relevée et la transmettre à l'unité de traitement.

- ✓ **Unité de traitement** : Elle exécute le programme écrit par l'utilisateur qui se traduit par la réalisation de tâches d'acquisition de grandeur via un capteur, de traitement de données acquises et d'émission vers le nœud collecteur, elle assure aussi le routage de paquets reçus destinés à d'autre nœud.
- ✓ **Module de communication (Transceiver)** : Elle est composée d'un émetteur/récepteur (module radio) permettant la communication entre les différents nœud du réseau.
- ✓ **Batterie** : Elle alimente l'ensemble des unités du nœud.
- ✓ **Mobilisateur** : C'est une unité optionnelle, elle est utilisée pour déplacer le nœud pour accomplir la tâche à traiter.
- ✓ **Système de localisation** : Il fournit des informations sur la localisation requise par l'application et/ou le routage.

1.2.3 Architecture logicielle

Des systèmes d'exploitation spécifiques ont été conçu pour les réseaux de capteurs sans fil car un capteur n'a pas assez de mémoire pour supporter un système d'exploitation comme Linux ou Windows qui prennent beaucoup d'espace mémoire et la contrainte énergétique des nœuds capteurs exige l'utilisation de systèmes d'exploitation légers, tels que TinyOS ou Contiki.

1.3 Réseaux de capteurs sans fil

1.3.1 Description des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) ou Wireless Sensor Networks (en anglais) sont constitués d'un ensemble de nœuds déployés en grand nombre de manière aléatoire formant une zone de couverture.

Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil[3].

1.3.2 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Dans un RCSF, la position des nœuds capteurs n'est pas obligatoirement prédéterminée, ils peuvent avoir des positions particulières ou bien être déployés aléatoirement dans une zone appelée zone d'intérêt, chaque nœud est chargé de collecter des informations sur son environnement. L'écoulement de données se termine vers des nœuds spéciaux appelés nœuds-puits ou stations de base (sink).

En d'autre terme le fonctionnement d'un RCSF se déroule comme suit :

Les nœuds sont éparpillés dans la zone à surveiller. Dès qu'un nœud détecte un évènement, il le traite et l'achemine vers la station de base via une communication multi-saut, par la suite, le puits transmet les informations reçues via l'internet ou par satellite à l'utilisateur final. Comme le montre l'exemple de la figure 1.3, une architecture d'un RCSF est construite autour de quatre entités principales [4] :



FIGURE 1.3 – Architecture d'un RCSF

- **Le capteur (sensor) :** Comme le dit bien son nom, il est en charge de mesurer une valeur relative à son environnement.
- **L'agrégateur (aggregator) :** Il est en charge d'agréger les messages qu'il reçoit de plusieurs capteurs puis de l'envoyer en un seul message au puits (sink). Cette opération a pour principal but de limiter le trafic sur le réseau et donc de prolonger la durée de vie globale du réseau de capteurs.
- **Le puits (sink) :** Le puits est le nœud final du réseau. C'est à lui qu'est envoyé l'ensemble des valeurs mesurées par le réseau. Il peut arriver qu'il y'ait plusieurs puits sur un même réseau de capteurs.

- **La passerelle (gateway) :** La passerelle est un dispositif qui a la particularité d'avoir deux interfaces réseau. Il permet de relier le réseau de capteurs sans fil à un réseau plus traditionnel, typiquement l'internet. En effet, habituellement le réseau de capteurs ne sert qu'à faire remonter les mesures, les applications traitant ces informations étant exécutées sur la machine de l'utilisateur final.

Le fonctionnement global de cette architecture consiste donc à ce que les capteurs fassent des mesures qu'ils font remonter au puits via les agrégateurs. L'application finale tournant sur une machine se situant sur un autre réseau à ainsi accès aux valeurs via une passerelle.

1.3.3 Différentes topologies des RCSF

La topologie détermine l'organisation des nœuds capteurs dans le réseau. Il existe en général trois types de topologies [5] : la topologie en étoile, la topologie maillée et la topologie cluster-tree.

- **Topologie en étoile :** la topologie en étoile est composée d'un nœud central appelé coordinateur ou sink du réseau de capteurs et d'une pluralité de nœud capteur sans fil (voir Figure 1.4). Dans cette topologie, tous les nœuds capteurs transmettent leurs données directement vers le coordinateur. Ainsi, l'architecture d'une telle topologie est caractérisée par une transmission à un saut. Dans cette topologie, le nœud central a la responsabilité de contrôler et de coordonner les nœuds capteurs qui communiquent exclusivement avec lui. L'intérêt de cette architecture est qu'elle limite au maximum le transport des données est donc très performante, en plus d'être relativement simple. L'inconvénient de cette topologie est que la station de base est vulnérable, car tout le réseau est géré par un seul nœud.



FIGURE 1.4 – Topologie en étoile

- **Topologie maillée :** La topologie maillée (voir Figure 1.5) est constituée d'un ensemble de nœuds reliés les un aux autres et agissant comme des routeurs. Chacun des nœuds transmet ses données à son voisin après avoir établi le meilleur chemin pour véhiculer les

données à travers le réseau jusqu'au puits (coordinateur ou sink), cette caractéristique permet de maintenir le fonctionnement du réseau en cas de panne d'un nœud. Cette topologie est alors plus robuste et flexible par rapport à la variation du nombre de nœuds. Quand il n'y a pas de transfert de données, les nœuds se mettent en mode veille pour économiser de l'énergie.

Ces inconvénients sont : Une consommation d'énergie plus importante est induite par la communication multi-sauts. Une latence est créée par le passage des messages des nœuds par plusieurs autres avant d'arriver à la station de base.

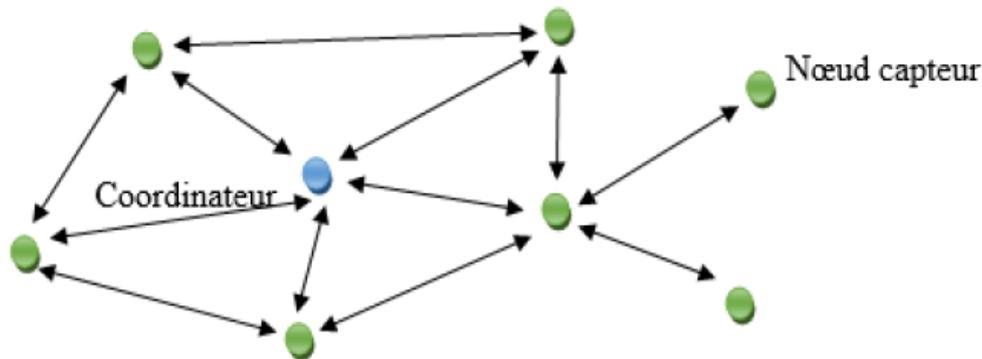


FIGURE 1.5 – Topologie maillée

- **Topologie cluster-tree** : La topologie cluster-tree (voir Figure 1.6) est partitionnée en groupes appelés "clusters". Un cluster est constitué d'un nœud particulier appelé "cluster-head" ou "tête de cluster" et d'autres nœuds. Ces derniers ne communiquent qu'avec leur "tête de cluster", ensuite ce dernier est chargé de faire suivre les messages reçus vers le puits du réseau. Cette topologie est alors hiérarchisée selon le rôle des éléments du réseau (coordinateur, têtes de cluster, nœuds). Il peut y avoir un changement de hiérarchie entre les nœuds et les têtes de cluster en fonction de l'énergie disponible dans chaque nœud. Cela permet d'équilibrer la différence des niveaux d'énergie de tous les nœuds afin d'éviter la disparition ou l'isolement d'un nœud et de mieux prolonger la durée de vie du réseau présentée par la suite.

En adoptant la topologie cluster-tree, chaque nœud dans le réseau est souvent muni d'un dispositif pour estimer le niveau de batterie du nœud. Ensuite, un protocole spécial doit être installé pour élire la prochaine tête de cluster suivant les niveaux de batterie de tous les nœuds dans le réseau.

La topologie arbre est parfois similaire à la topologie cluster-tree, seulement il n'y a pas de tête de cluster mais ce sont les nœuds simples qui jouent le rôle de relai dans le réseau.

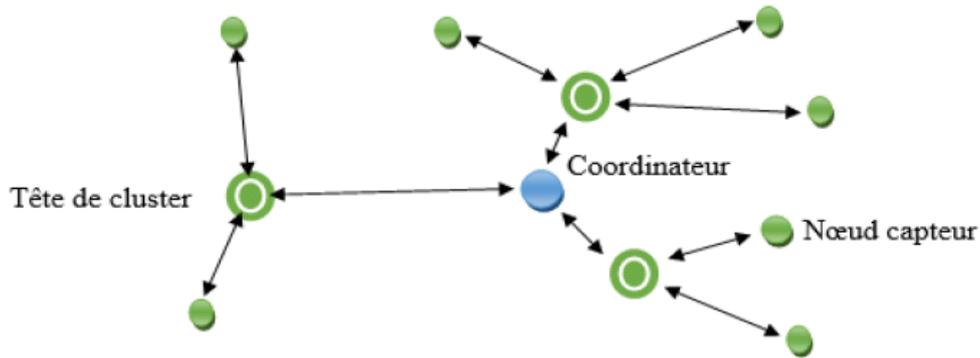


FIGURE 1.6 – Topologie cluster-tree

1.3.4 Système d'exploitation pour les RCSFs

Un système d'exploitation a pour mission de jouer l'intermédiaire entre l'utilisateur et les périphériques matériels. Il semble nécessaire pour des types d'applications complexes sur les RCSF.

Plusieurs systèmes d'exploitation ont été développés pour répondre aux contraintes particulières des réseaux de capteurs parmi lesquels on cite :

- **TinyOS :**

TinyOS est un système d'exploitation open-source spécialement développé pour les applications embarquées fonctionnant en réseaux et en particulier pour les réseaux de capteurs sans fil [6]. Son architecture est basée sur une association de composants s'appuyant sur le langage NesC (network embedded system C) qui est presque similaire au langage C [7].

- **Contiki [8] :** Contiki est un système d'exploitation open source multitâche développé pour une série de plates-formes comprenant des microcontrôleurs. Contiki a été construit autour d'un noyau "event-driven" mais il est possible d'utiliser le multithread pour certains programmes aussi bien que le chargement et le remplacement dynamiques de différents programmes et services. Comparé à TinyOS, qui est statiquement lié à la version compilée, Contiki permet de substituer des programmes et des pilotes (drivers) en temps réel et sans recompilation.

- **MantisOS [9] :** MantisOS est un système d'exploitation conçu pour les RCSF, principalement développé et soutenu par l'université américaine de Colorado. Le langage de programmation pour la conception de ce système est le langage C.

1.3.5 Principales caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil

Donc pour concevoir un RCSF, il est essentiel de tenir compte des paramètres cités ci-dessus, en effet ces facteurs servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les RCSF. Parmi les caractéristiques les plus importantes d'un réseau de capteurs, nous citons [10] :

- **Durée de vie** : C'est la caractéristique la plus fondamentale d'un réseau de capteur. Elle dépend du type d'application et donc de la durée et de l'échantillonnage des mesures. Les contraintes liées au changement (ou rechargement) des batteries sont dépendantes des déploiements et du coût de maintenance des nœuds. Il est donc essentiel d'avoir une durée de vie du réseau la plus longue possible.
- **Etendu du réseau** : La plupart des réseaux de capteurs sont composés de quelques dizaines de nœuds, mais certaines applications peuvent exiger l'utilisation des réseaux de capteurs composés de centaine ou de milliers de nœuds. La zone que doit couvrir le réseau est également importante dans son dimensionnement.
- **Faible coût** : Les réseaux de capteurs peuvent contenir un nombre important de nœuds. Il est donc nécessaire d'avoir un coût unitaire par nœuds le plus faible possible, pour obtenir un coût raisonnable du réseau global.
- **Scalabilité** : Dans le cas d'un nœuds endommagé, le réseau doit être capable de prendre en considération cette modification tout en assurant une qualité de service égale. La redondance des capteurs peut être un moyen d'assurer cette fonction. La notion de scalabilité est alors utilisée pour dire que l'architecture et les protocoles de communications du réseau doivent s'adapter et prendre en compte l'ajout ou la perte des nœuds dans le réseau.
- **Faible complexité matérielle et logicielle** : Les fonctionnalités mises en œuvre par la partie matérielle se doivent être aussi simples que possible, car l'augmentation de la complexité de cette dernière peut conduire à une augmentation de la consommation d'énergie. La complexité de la partie logicielle doit également être faible sous peine d'augmenter les consommations liées aux accès mémoire.
- **Auto-configuration** : Un réseau de capteurs doit pouvoir configurer tous ses paramètres indépendamment de son environnement d'installation. Selon le nombre de nœuds, et selon leur déploiement, une configuration manuelle n'est pas du tout envisageable.

Le réseau doit par exemple être capable d'identifier les positions des nœuds, ce qui lui permettra d'identifier et de tolérer d'éventuelles pannes par exemple (problème de batterie) ou bien encore d'intégrer de nouveaux nœuds.

1.3.6 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil

La diminution de la taille et des coûts des capteurs ainsi que l'évolution des supports de communication sans fil, ont élargi le champ d'application des réseaux de capteurs. Ils s'insèrent notamment dans d'autres systèmes tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage. Certains prospectivistes pensent que les réseaux de capteurs pourraient révolutionner la manière même de comprendre et de construire les systèmes physiques complexes, notamment dans les domaines militaire, environnemental, domotique et de la sécurité, etc.

1.3.6.1 Applications environnementales

Les réseaux de capteurs sont beaucoup appliqués dans ce domaine pour détecter les catastrophes naturelles (feux de forêts, tremblements de terre, etc), détecter des fuites de produits toxiques (gaz, produit chimique, élément radio active, pétrole, etc), surveiller des catastrophes naturelles, détecter des pollutions et suivre des écosystèmes.

1.3.6.2 Applications militaires

Comme exemple d'application dans le domaine militaire : à un réseau de capteurs déployé sur un endroit stratégique ou d'accès difficile, afin de surveiller toutes les activités des forces ennemies, ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations).

1.3.6.3 Applications domotiques

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, etc. Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance. Le déploiement des capteurs de mouvement et de température dans les futures maisons dites intelligentes permet d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que : la lumière s'éteint et la musique s'arrête quand la chambre est vide, la climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure, etc.

1.3.6.4 Applications médicales

Les réseaux de capteurs sont également largement répandus dans le domaine médical. Cette classe inclut des applications comme : fournir une interface d'aide pour les handicapés, facilitant ainsi le diagnostic de certaines maladies (la surveillance de la glycémie, les organes vitaux ou la précoce de cancers), surveiller en permanence les malades et les médecins à l'intérieur de l'hôpital.

1.3.6.5 Applications à la sécurité

Les structures d'avions, navires, automobiles, métros, etc. pourraient être suivies en temps réel par des réseaux de capteurs. Les altérations de structure d'un bâtiment, d'une route, d'une voie ferrée, d'un pont pourraient être détectées par des capteurs préalablement intégrés dans les murs ou dans le béton, sans alimentation électrique ni connexions filaires.

1.3.6.6 Applications agricoles

Dans les champs agricoles, les capteurs peuvent être semés avec les graines. Ainsi, les zones sèches seront facilement identifiées et l'irrigation sera donc plus efficace.

La figure 1.7 présente quelques domaines d'application des RCSF



FIGURE 1.7 – Quelques domaines d'application des RCSF

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts généraux liés aux réseaux de capteurs sans fil, à savoir la définition et l'architecture d'un noeud capteur et d'un réseau de capteurs, leurs caractéristiques et leurs domaines d'applications.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter l'importance de la localisation, les technologies utilisées dans la localisation, puis nous abordons les méthodes et les algorithmes de la localisation dans les réseaux de capteurs sans fil.

CHAPITRE 2

SYSTÈMES DE LOCALISATION DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FILS

2.1 Introduction

Ces dernières années les RCSFs sont devenus de plus en plus populaires en raison de leur large champ d'applications civiles et militaires : environnement, agriculture, météorologie, santé, domotique...

Le but final d'un RCSF est de surveiller une zone d'intérêt, mais pour y parvenir plusieurs contraintes doivent être atteints. Parmi ces services : la synchronisation entre nœuds, la localisation, la gestion de la topologie, l'agrégation des données, le stockage de données, etc.

La localisation des nœuds est l'un des services les plus importants. Elle consiste à associer à chaque nœud les coordonnées de sa position. Plusieurs techniques ont été exploitées pour réaliser cette fonctionnalité, l'une consiste à équiper tous les capteurs par des systèmes de positionnement (par exemple GPS). Cependant, une solution alternative plus efficace a été proposée consiste à n'équiper qu'un faible nombre de capteur avec des systèmes de localisation, les autres nœuds non équipés doivent eux-mêmes déterminer leurs position à travers des méthodes de localisation.

Dans ce chapitre, nous commençons par les objectifs de la localisation et puis on définit le système de localisation, les technologies de mesure et les méthodes de calcul de position utilisés pour la localisation, on passe ensuite à la descriptions des algorithmes de localisation.

2.2 Importance de la localisation

De nombreuses applications reposent sur la connaissance de l'emplacement des nœuds de capteurs. Dans ce type d'applications un événement détecté par un capteur n'est utile que si une information relative à sa localisation géographique est fournie. Sans cette information, ces applications n'auraient aucun sens. C'est parce que les utilisateurs ont normalement besoin de savoir non seulement ce qui se passe, mais aussi où les événements intéressés se produisent ou où la cible est.

Par exemple, dans la surveillance hospitalière, la connaissance de la position du patient peut aider les médecins à arriver au bon endroit aussi rapidement que possible en cas d'urgence. Lors d'une opération de secours en cas de catastrophe, on utilise les RCSFs pour localiser les survivants dans un bâtiment effondré ou dans le cas de la surveillance des feux de forêt, il est critique que les capteurs rapportent des informations de surveillance avec leur emplacement.

D'autre part, la localisation des nœuds est nécessaire, non seulement pour localiser les différents événements survenus dans la zone surveillée, mais aussi pour le développement de protocoles de routage de l'information récoltée, pour la couverture de la zone d'intérêt, pour l'agrégation des données, etc. Elle est la première tâche exécutée par les nœuds après leur déploiement.

Par conséquent, la recherche dans les algorithmes de localisation pour les RCSFs est devenue un sujet important.

2.3 Localisation dans les RCSFs

Les techniques de localisation dans les RCSFs sont utilisées pour estimer l'emplacement des capteurs sans position connu auparavant dans le réseau en utilisant les informations de position de quelques capteurs spécifiques dans le réseau et leurs intermesures tels que : la distance, le décalage horaire d'arrivée, l'angle d'arrivée et la connectivité.

Les capteurs avec les informations de localisation, a priori connus, sont appelés ancres ou références et leurs emplacements peut être obtenu en utilisant un système de positionnement global (GPS), ou bien en installant des points d'ancrage à des points avec des coordonnées connues[11].

2.4 Composition d'un système de localisation

Un système de localisation peut être décomposé en trois parties distinctes. Chaque partie a son propre objectif et méthodes de résolution. Elles seront étudiées séparément. Ces trois parties (sous-systèmes) sont[12] :

- ✓ **Estimation de distance/angle** : cette partie permet d'estimer la distance et/ou l'angle entre deux nœuds. Cette information est utilisée par la suite par les deux autres parties (estimation locale).
- ✓ **Calcul de la position** : cette partie permet d'estimer la position d'un nœud en se basant sur les mesures de distances et/ou d'angles disponibles et sur les positions des nœuds de références (ancres, amers) en utilisant la triangulation par exemple.
- ✓ **Algorithme de localisation** : c'est la partie la plus importante du système de localisation. Elle définit la manière avec laquelle les informations disponibles (distances, angles, positions des nœuds déjà localisés) sont manipulées afin que la grande partie ou la totalité des nœuds puissent estimer leurs positions.

Les performances d'un système de localisation sont directement liées aux performances de chacune de ces parties ayant leur propre objectif et méthodes de résolution qui sont décrites dans le reste de ce chapitre.

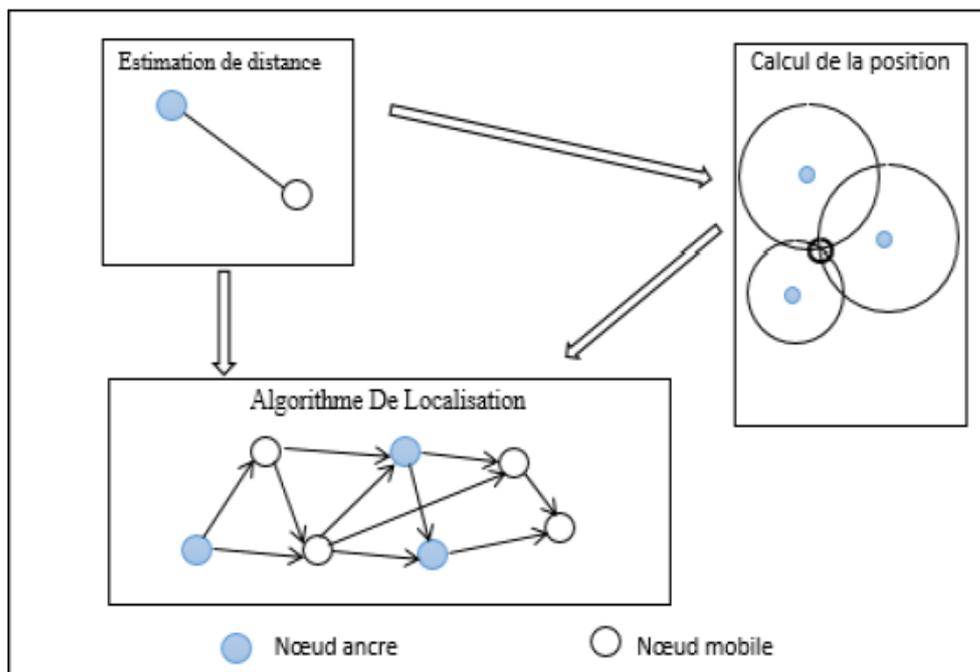


FIGURE 2.1 – Composition d'un système de localisation

2.4.1 Estimation de distance/angle

Plusieurs métriques permettent à un capteur de mesurer la distance entre deux nœuds ou bien de mesurer l'angle qu'il forme avec celui-ci. Cette estimation est très importante car elle sera utilisée pour le calcul de la position par l'algorithme de localisation.

1. Nombre de sauts RHC (Radio Hop Count)

La méthode RHC est basée sur le constat suivant : si deux nœuds peuvent se communiquer, alors la distance entre eux est inférieure à la portée maximale (R) du dispositif de communication[14].

Il s'agit du nombre de liens radios empruntés par un message de la source à la destination à travers des nœuds relais. Ceci implique la capacité pour les intermédiaires de modifier certains champs de la trame. Ils doivent à minima pouvoir incrémenter le champ dédié au nombre de sauts avant de retransmettre le message.

L'information de connectivité définit un graphe non orienté dont les sommets sont les nœuds du réseau et les arêtes représentent les liens directs de communication. Le nombre de sauts h_{ij} entre deux nœuds S_i et S_j est défini comme la longueur du plus court chemin entre ces deux nœuds.

Si d_{ij} est la distance entre S_i et S_j alors : $0 < d_{ij} < R \cdot h_{ij}$

Si le nombre de voisins (les nœuds relais) est connu, la longueur d'un saut peut être estimée (d_{hop}). La distance entre les nœuds i et j devient :

$$d_{ij} \approx d_{hop} \cdot h_{ij} \quad (2.1)$$

Dans le cas d'existence d'obstructions la méthode donne des résultats encore moins précises. En effet, le nombre de sauts entre deux nœuds peut être grand, même s'ils sont proches l'un de l'autre mais un obstacle les sépare et qui ne leur permet pas de communiquer directement[13].

2. Indicateur de puissance du signal reçu (RSSI)

La métrique RSSI (Received Signal Strength Indicator) considère la perte de puissance d'un signal entre son émission et sa réception. Cette perte varie en fonction de la distance entre les deux capteurs : plus les capteurs sont éloignés (resp. proches), plus la perte est importante (resp. faible). Cette perte sera alors traduite en une distance[12].

La formule générale pour calculer la puissance du signal reçu dans un espace libre est [14] :

$$P_{r(d)} = P_{r(d_0)} - 10\alpha \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.2)$$

- $P_{r(d_0)}$: c'est la puissance du signal reçu à distance d_0 de l'antenne mobile.
- d : la distance de base entre l'émetteur et le récepteur.
- α : constante connue, elle présente le coefficient d'affaiblissement du signal radio, en espace libre $\alpha = 2$.

Avantages [15] :

- Pas besoin d'équipements radio spécifiques.
- Faible coût car tous les nœuds sont déjà équipés de dispositifs de communication sans fil, de plus la métrique RSSI ne rajoute aucun surcoût de communication.
- Algorithme de positionnement simple.

Inconvénients [16] :

- Plus les capteurs sont éloignés, plus la perte du signal est importante.
- Sensibilité aux bruits (Ce bruit est dû à la propagation d'onde radio qui n'est pas uniforme en environnement réel).
- Obstacles (comme les murs, les meubles et autres reflètent et absorbent les ondes radio) et types d'antenne.

3. Temps de parcours ToA

La métrique ToA (Time of Arrival) suppose que les nœuds du réseau sont synchrones. La distance qui sépare deux capteurs se déduit de la vitesse de propagation du signal et de la différence entre les dates d'émission et de réception du message. Cette technologie est celle utilisée par le système GPS. Lorsque les nœuds ne sont pas synchrones, l'envoi d'un message aller-retour est nécessaire. En fonction de son horloge, de la vitesse de propagation du signal et du temps de traitement du signal reçu, un capteur-récepteur obtient la distance qui le sépare du capteur émetteur en calculant la différence entre les dates d'émission et de réception, en y soustrayant le temps de traitement du signal, puis en divisant le résultat par deux. Cela suppose que les nœuds du réseau ont un temps de traitement du signal identique.

$$\text{Distance} = \text{Temps} * \text{Vitesse} \quad (2.3)$$

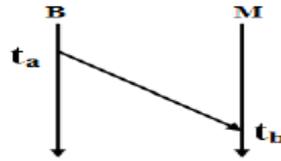


FIGURE 2.2 – Principe du ToA

où $Vitesse \cong 3 * 10^8 \text{ m/s}$

et $Temps = t_b - t_a$

avec :

- t_a : l'heure de la réception.
- t_b : l'heure de l'envoi.

Avantages [17, 18] :

- Algorithmes de positionnement simple.
- Précision plus élevée en milieu confiné.

Inconvénients [16] :

- Nécessité la synchronisation parfaite entre l'émetteur et le récepteur.
- Nécessité d'avoir le trajet direct.
- Nécessité d'une résolution temporelle élevée au récepteur.

4. Temps de parcours TDoA

La métrique TDoA (Time Difference of Arrival) se base sur la différence des dates d'arrivée d'un ou plusieurs signaux et suppose également que la vitesse de propagation des signaux est connue[19]. La méthode TDoA (Time Difference of Arrival) a deux variantes[13] :

- (a) La différence du temps pris par un signal envoyé par un nœud pour arriver au niveau de trois nœuds ou plus. Cette variante est bien connue dans les réseaux cellulaires. Elle nécessite une synchronisation parfaite des stations de base.
- (b) La différence de temps pris par deux signaux envoyés par un même nœud pour arriver au niveau d'un autre nœud. Chaque nœud doit être équipé de deux dispositifs émission/réception.

Dans chacun des cas le premier nœud émet les deux signaux simultanément. Pour chaque signal reçu, le deuxième nœud note son temps d'arrivée et ainsi il peut calculer la différence. En général, le premier signal est utilisé pour déclencher un compteur et dès l'arrivée du deuxième signal, le nœud aura directement la différence de temps d'arrivée.

En connaissant les vitesses de propagation des deux signaux et l'écart de temps entre les deux réceptions, le nœud récepteur peut facilement calculer sa distance par rapport à l'émetteur. La Figure 2.3 illustre le principe du TDoA. avec :

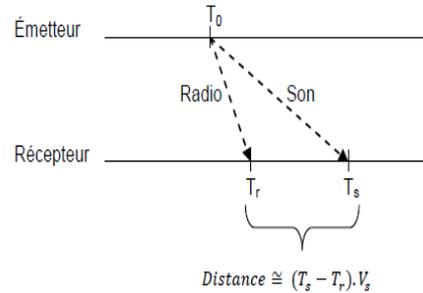


FIGURE 2.3 – Principe du TDoA

- T_r : le temps d'arrivée du signal radio.
- T_s : le temps d'arrivée du signal sonore (ou ultrasonore).
- V_s : la vitesse du signal sonore (ou ultrasonore).

Avantages [20] :

- Algorithme de positionnement simple.
- Précision plus élevée en milieu confiné.
- Pas besoin de synchronisation d'horloges entre le mobile et les stations de bases.

Inconvénients [20] :

- Nécessité d'avoir le trajet directe.
- Synchronisation d'horloges nécessaire entre les paires de stations de base.
- Nécessité d'une résolution temporelle élevée au récepteur.

5. Temps de parcours AoA

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

Avantages [20] :

- Moins de stations de base fixes nécessaires (elle peut permettre de faire de la localisation en 2-D avec seulement deux stations de base réceptrices)
- Algorithme de positionnement simple.

Inconvénients [20] :

- Antenne directionnelles : coûteuse et complexes à mettre en œuvre.
- Nécessité d'avoir trajectoire directe.

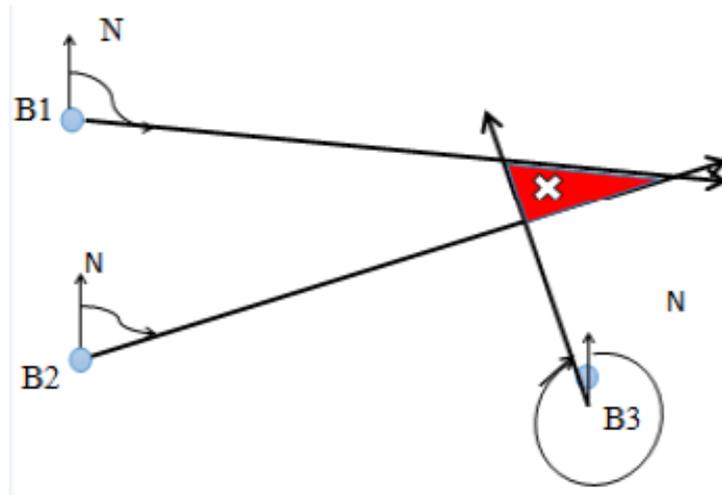


FIGURE 2.4 – Principe de AOA

- Mauvaise performances dans un canal ayant un profil de propagation par trajet multiple sévère.

Le Tableau 2.1 illustre les caractéristiques essentielles des méthodes décrites dans les paragraphes précédents [13] :

Méthode	précision	Distance maximale	Matériel supplémentaire	Défis
RSSI	2-4 m	La portée	rien	Variation du RSSI, interférence
ToA	2-3 m	La portée	rien	Synchronisation des nœuds
TDoA	2-3 m	Quelque mètres (2-10 m)	Capteur a ultra-son	La distance maximale
AoA	Quelques degrés	La portée	Un ensemble de récepteur	Travailler avec des nœuds de petite taille

TABLE 2.1: Comparaison des méthodes d'estimation des distances/angles

2.4.2 Calcul de position

Quand un nœud a suffisamment d'information de distances/angles et de position (des ancres), il peut calculer sa position. Il n'y a pas de solution générale et idéale qui fonctionne pour tous les scénarios. Pour cela, plusieurs méthodes sont utilisées parmi lesquelles on cite : Trilatération, Triangulation, Centroid, MinMax.

Le choix de la méthode de calcul de la position influe sur les performances finales du système de localisation. Ce choix dépend des informations disponibles et des ressources du processeur.

1. Trilatération

La trilatération permet de positionner un nœud à l'aide de trois nœuds de référence, elle consiste à mesurer les distances qui séparent le nœud à positionner aux nœuds de référence. Ensuite, on trace un cercle autour de chaque nœud de référence, le nœud à positionner se situe à l'intersection de ces trois cercles [21], comme le montre la figure 2.5 :

Les équations des cercles centrés aux positions des ancres A_1 , A_2 et A_3 et qui ont comme

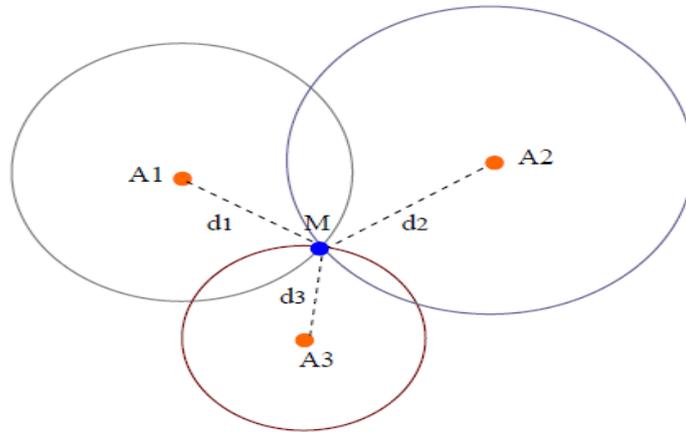


FIGURE 2.5 – Trilatération

rayon d_1 , d_2 et d_3 respectivement sont définies comme suit :

$$(\hat{x} - x_1)^2 + (\hat{y} - y_1)^2 = d_1^2 \quad (2.4)$$

$$(\hat{x} - x_2)^2 + (\hat{y} - y_2)^2 = d_2^2 \quad (2.5)$$

$$(\hat{x} - x_3)^2 + (\hat{y} - y_3)^2 = d_3^2 \quad (2.6)$$

- (\hat{x}, \hat{y}) : les coordonnées du nœud à localiser (M).
- (x_i, y_i) : les coordonnées de l' i ème ancre (A_1, A_2 et A_3).
- d_i : La distance entre le nœud à localiser et l' i ème ancre.

2. Triangulation

La triangulation utilise les propriétés géométriques du triangle pour pouvoir positionner un nœud à partir de deux nœuds de référence. Il utilise pour cela : la loi des sinus et le théorème d'Al Kashi[12].

La triangulation ressemble à la trilatération, mais elle utilise les angles à la place des distances.

On considère deux ancres $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$ à portée de mobile $M(x, y)$. Les deux disposent des moyens matériels afin de mesurer l'angle sous lesquels elles reçoivent le signal de M . Soient α , β ces deux angles.

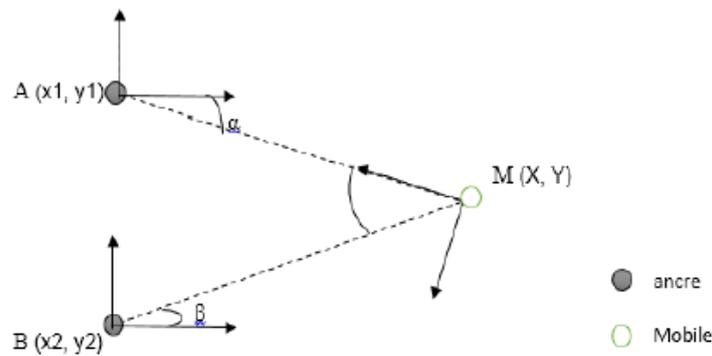


FIGURE 2.6 – Principe de la triangulation

Le point M est formé par l'intersection des droites passant par les couple (A, M) et (B, M) (voir Figure 2.6). En définissant un repère dont l'origine est B ou (B, A) se confond avec l'axe des ordonnées, on obtient les coordonnées (position) du mobile donné par la formule :

$$M\left(\frac{y_2}{\tan \alpha + \tan \beta}, \frac{y_2 \tan \alpha}{\tan \alpha + \tan \beta}\right) \quad (2.7)$$

3. MinMax

Le principe de cette méthode est de déterminer, pour chaque ancre, un cadre le contenant, dont le centre de gravité correspond à sa position estimée et dépend de la distance estimée (d_i). Sur la figure 2.7, le capteur M associe un cadre à chacune des ancres A , B et C .

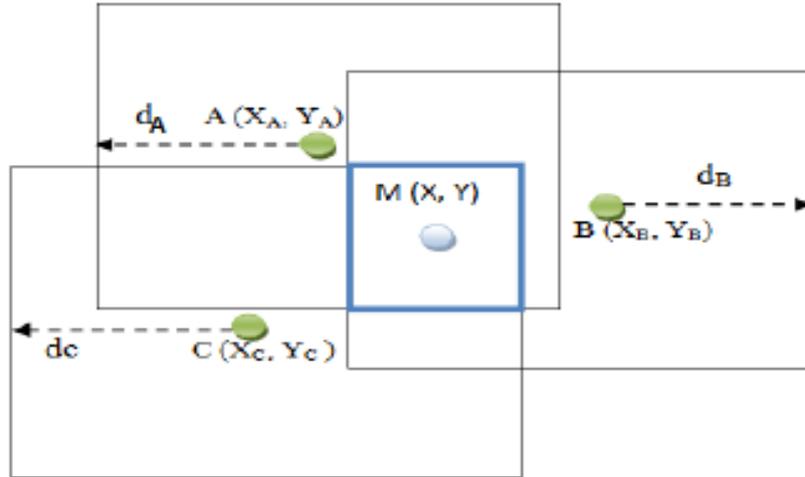


FIGURE 2.7 – Principe de MinMax

Pour chaque ancre i , les coordonnées $(X_i - d_i, Y_i - d_i)$ et $(X_i + d_i, Y_i + d_i)$ pour les coins inférieurs gauches et supérieurs droits respectivement. L'intersection de tous les cadres englobant donne les positions possibles du nœud à localiser. Cette intersection peut être calculée facilement en prenant le maximum des coordonnées inférieures et le minimum des coordonnées supérieures.

Par exemple le cadre centré en A est construit comme suit :

$$((X_A - d_A), (Y_A - d_A)) \text{ et } ((X_A + d_A), (Y_A + d_A)) \quad (2.8)$$

L'intersection de ces cadre forme un nouveau cadre défini par :

$$(\text{Max}(X_i - d_i), \text{Max}(Y_i - d_i)) \text{ et } (\text{Min}(X_i + d_i), \text{Min}(Y_i + d_i)), i \in \{A, B, C\} \quad (2.9)$$

La position finale du nœud mobile est le centre du rectangle obtenu, elle est calculée comme suit :

$$(\hat{X}, \hat{Y}) = \left(\frac{\text{Max}(X_i - d_i) + \text{Min}(X_i + d_i)}{2}, \frac{\text{Max}(Y_i - d_i) + \text{Min}(Y_i + d_i)}{2} \right) \quad (2.10)$$

4. Centroïde

la méthode Centroïde (CL) La méthode Centroïde est le centre (point) de gravité d'ensemble des points, on dit le centre de gravité d'un triangle le point où tous les trois médians d'un triangle se coupent, par contre dans un rectangle c'est l'intersection de ses deux pendons, on peut obtenir le centre de gravité par la valeur moyenne de la coordonnée (\hat{x}, \hat{y}) de tous les sommets.

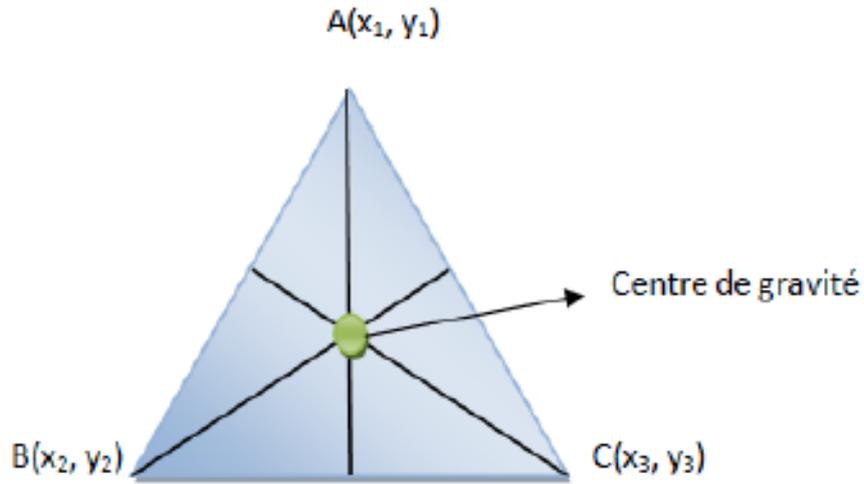


FIGURE 2.8 – Principe de Centroide

Dans la figure 2.8, les trois sommets du triangle sont $A(X_1, Y_1)$, $B(X_2, Y_2)$ et $C(X_3, Y_3)$.

Le Centroide de points, A , B et C est :

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left(\frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}, \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{3} \right) \quad (2.11)$$

5. **Bilan et synthèse sur les techniques de calcul de la position** Un ensemble de méthodes qui peuvent être utilisées pour le calcul de la position a été exposé. Il est à noter que cette présentation n'est pas exhaustive. Le choix de la méthode de calcul de la position influe sur les performances finales du système de localisation.

Il n'y a pas de solution générale et idéale qui fonctionne pour tous les scénarios. Le choix de la méthode dépend des informations collectées et des ressources d'un capteur.

Le Tableau 2-2 compare les principales caractéristiques des méthodes de calcul de la position présentées dans les paragraphes précédents [13] :

Méthode	Nombre de références	Distance	Angle	Défi
Trilatération	3	Oui	Non	Sensible aux imprécisions des distances
Triangulation	3	Non	Oui	Besoin du matériel supplémentaire
MinMax	$n \geq 2$	Oui	Non	Erreur de la position finale
Centroïde	$n \geq 2$	Oui	Non	Erreur de la position finale

TABLE 2.2: Les principales caractéristiques des méthodes de calcul de position.

2.5 Méthodes de localisation

2.5.1 Méthodes Range-free

Ces méthodes ne calculent jamais de distances entre voisins. Elles utilisent d'autres informations telles que le nombre de sauts et la connectivité pour identifier la position des noeuds. Dans un objectif de simplicité et de réduction du coût, ces méthodes supposent que le déploiement des noeuds respecte certaines contraintes et propose des calculs plus ou moins complexes pour évaluer la position. Parmi les méthodes Range-free nous citons : DV-HOP.

2.5.1.1 DV-HOP

C'est le schéma le plus basique, il utilise un échange de vecteur de distance afin que tous les noeuds du réseau parviennent à calculer la distance qui les séparent des ancres. Chaque ancre maintient une table $\{X_i, Y_i, h_i\}$ où (X_i, Y_i) sont les coordonnées des autres ancres du réseau et h_i est le nombre de sauts séparant ce dernier du noeud en question.

Chaque ancre calcule la distance qui le séparent des autres ancres dans le réseau, en utilisant les informations de localisation obtenues à partir d'un système de positionnement, on déduit une approximation de la distance par saut. C'est la distance par saut qui va constituer l'information de correction pour tout le réseau.

Chaque nœud ancre calcule :

$$\text{hopSize} = \frac{\sum \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}}{\sum h_{ij}} \quad i \neq j \quad (2.12)$$

Après avoir calculé le hopSize on peut calculé la distance entre deux nœud (d_{ij}) on prendent le hopSize moyen qu'on'a trouvé telque :

$$d_{ij} \approx \text{hopSize} \cdot h_{ij} \quad (2.13)$$

L'avantage du DV-Hp est sa simplicité due au fait qu'il n'exige pas que la distance soit mesurée. L'inconvénient est qu'il n'est adapté qu'aux réseaux isotropes où les propriétés du graphe sont indépendantes de la direction.

2.5.2 Méthodes Range-based

Les méthodes Range-based utilisent les technologies ToA, RSSI, AoA et autres afin de mesurer les distances ou les angles entre deux capteurs voisins. Grâce à cette capacité de mesure un capteur pourra sous certaines conditions d'obtenir sa position exacte. Les méthodes Range-based les plus répandues sont : SumDistMinMax, DV-Distance et DV-Enclidean.

2.5.2.1 SumDistMinMax

Dans cette méthode, chaque ancre commence par diffuser sa position. Lorsqu'un capteur reçoit cette position, il estime la distance. Elle consiste à sommer les distances mesurées avec cette méthode entre chaque paire de capteurs voisins séparant l'ancre et le capteur qui cherche à estimer sa position. Lorsqu'une ancre envoie sa position, elle joint au message la distance qui la sépare d'elle même, c'est à dire 0. A la réception de ce message, chaque capteur voisin mesure la distance avec l'émetteur, l'enregistre, ajoute cette distance à celle contenue dans le message et fait suivre la position de l'ancre avec la distance mise à jour. Le même processus est répété pour tous les capteurs [27].

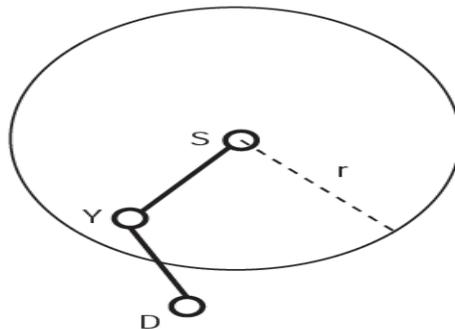


FIGURE 2.9 – Algorithmme SumDistMinMax

La figure 2.8 illustre le fonctionnement de SumDist. Sur cette figure, la distance estimée entre les noeuds S et D est égale à $d_{SY} + d_{YD}$.

Soit x_1, x_2, \dots, x_q des capteurs, A étant un chemin d'un capteur x_1 vers une ancre A , l'estimation de la distance entre x_1 et A notée d_{x_1A} est définie de façon récursive comme suit :

$$d_{x_1A} = d_{x_1x_2} + d_{x_2A} \quad (2.14)$$

Après cette phase d'estimation des distances avec les ancres, les capteurs calculent leurs positions estimées en utilisant la méthode MinMax.

2.5.2.2 DV-Distance

Cette méthode est similaire à la méthode DV-hop. La différence est que DV-distance est une méthode basée sur les distances, alors que DV-hop est une méthode basée sur le nombre de sauts.

La distance entre deux noeuds voisins est mesurée par la technique RSSI. Durant la première phase d'inondation, les ancres commencent par diffuser leurs positions et une distance initialement égale à zéro.

Les noeuds qui reçoivent cette information additionnent la distance contenue dans le paquet avec les distances estimées qui les séparent des noeuds transmetteurs. Les informations continuent d'être propagées jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de messages générés ou que la limite d'inondation (le TTL ou lime To Live) soit atteinte. Le TTL est le nombre de sauts maximum qui pourra être traversé par les paquets.

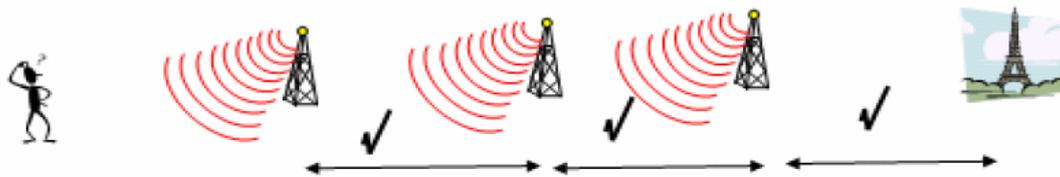


FIGURE 2.10 – Algorithme DV-Distance

2.5.2.3 DV-Euclidean

Cette troisième méthode repose sur la propagation de la distance euclidienne séparant le noeud de l'ancre.

Soit un noeud A du réseau, pour déterminer sa position, il doit recevoir la position d'au moins deux de ses voisins : B et C . (figure 2.6). A doit également estimer les distances AB

et AC par mesure de puissance du signal reçu, et BC qui peut être déduite à partir de la reconstitution du voisinage de A . Si on considère le quadrilatère $ABCL$, où les cotés sont tous connus, la diagonale BC l'est aussi, on peut donc calculer AL qui représente la distance euclidienne de A au ancre L . Cette méthode de propagation a l'avantage d'utiliser les mesures réelles, coordonnées GPS par exemple, ce qui évitera la propagation d'erreur de mesure.

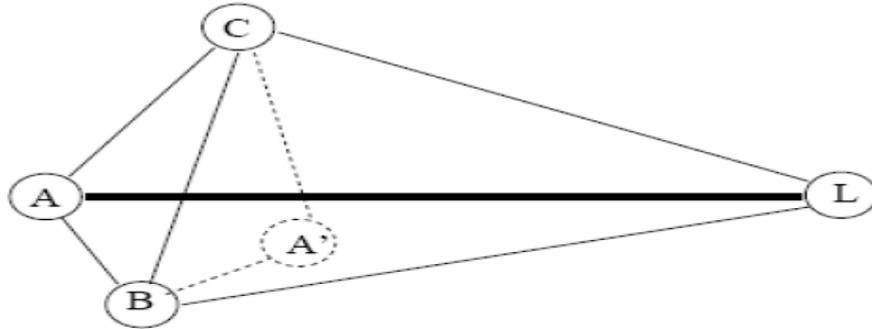


FIGURE 2.11 – Algorithme DV-Euclidean

2.5.3 Forme d'implémentation

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

2.5.3.1 Méthodes centralisées

Tous les noeuds communiquent avec leurs voisins et renvoient à l'ordinateur central soit des informations sur le signal, soit directement les distances. L'ordinateur central s'occupe si nécessaire d'estimer les distance à partir des informations sur le signal et ensuite de localiser les noeuds [28] .

2.5.3.2 Méthodes distribuées

Dans cette méthode tous les noeuds communiquent avec leurs voisins pour estimer les distances et échangent leurs informations de voisinage. Ils dérivent ensuite de façon distribuée la position de tous les noeuds dans le réseau. C'est-à-dire qu'à la fin du processus de localisation, chaque noeud doit connaître sa position ainsi que celles de ses voisins et ce sans l'aide d'un ordinateur central qui effectuerait les calculs. Pour les grands réseaux, on considère qu'une méthode distribuée est nécessaire car les méthodes centralisées demanderaient trop de communication pour l'acheminement des informations vers l'unité centrale et consommeraient donc trop d'énergie [29].

2.6 Les technologies de signaux utilisés dans la localisation

On distingue plusieurs types de signaux utilisés dans la localisation selon le type de capteurs, l'environnement ou bien selon la technologie de mesure utilisée.

2.6.1 Infrarouges

L'un des premiers systèmes de localisation utilisant la technologie infrarouge est le système Active Badge élaboré entre 1989 et 1992. Le mobile à localiser est équipé d'un tag infrarouge émettant un signal infrarouge toutes les 10 secondes. Les récepteurs sont installés au plafond dans chaque pièce de l'environnement. Ces récepteurs sont reliés entre eux pour former un réseau permettant de détecter le tag actif. [22]

Cette technologie a été retenue à cette période car elle est peu coûteuse. De plus, la portée des capteurs utilisés est de 6 m. Pour des utilisations dans de petites pièces, de nombreuses réflexions sont présentes et facilitent la détection. Un désavantage par rapport aux technologies radio est que ces signaux ne traversent aucune cloison, même légère, ce qui confine la portée du système à une pièce ou couloir. La présence de la lumière du jour, sous certaines incidences peut aussi constituer un frein au développement de cette technologie car cette lumière perturbe le fonctionnement du récepteur infrarouge.

2.6.2 (Ultra) sons

Il y a eu beaucoup de recherches sur la localisation à base de sons ou ultrasons. Le principal avantage de la technologie est que la vitesse de propagation du son est assez lente, en comparaison à celle des ondes. Cela permet de mesurer les temps de propagation précisément et ainsi d'obtenir des estimations de distances fiables. Le système cricket [23], par exemple, combine des communications par radio et des émetteurs/récepteurs de sons pour se localiser. Pour calculer les distances jusqu'à ses voisins, un 'cricket' envoie simultanément une onde radio et une onde sonore ayant une certaine forme caractéristique. Les noeuds qui reçoivent l'onde radio démarrent un minuteur et attendent l'arrivée de l'onde sonore. Lorsque celle-ci arrive ils consultent le minuteur et peuvent ainsi déduire le temps de propagation du son. A partir de cela ils calculent les distances de façon assez précise et en déduisent les positions.

La seule restriction de ce système est qu'il ne peut être utilisé sur de trop longues distances et qu'il est parfois difficile à utiliser dans des environnements trop bruyants ou ayant des obstacles ou des murs .

2.6.3 Radio frequency

2.6.3.1 GPS : Global positioning system

La technologie de localisation la plus répandue est sans doute le GPS. Il remplit très bien son rôle de système de localisation à l'échelle planétaire [24]. Les satellites émettent en continu des signaux radios. Ces signaux radios contiennent une description des trajectoires de chaque satellite. Les récepteurs GPS reçoivent ces informations et connaissent ainsi les positions des satellites. Ils calculent également les temps que prends l'onde radio pour arriver de chaque satellite et en déduisent ainsi les distances jusqu'à chacun d'eux. Ils déduisent ensuite, en utilisant la multilatération, leurs positions.

2.6.3.2 RFID : Radio Frequency Identification

Le RFID est une technologie très en vogue. Elle permet par exemple de localiser et identifier un objet dans un stock. Les premiers systèmes RFID furent inventés en 1939 par des anglais sous le nom d'IFF (Identification Friend or Foe) et furent utilisés durant la deuxième guerre mondiale par les pilotes alliés afin d'identifier les autres avions comme amis ou ennemis.

Le principe du RFID est basé sur l'utilisation d'étiquettes ou tag radio qui peuvent être fixées sur des objets et d'un lecteur radio, fixé généralement sur le mobile dont on souhaite estimer la position. Il est aussi possible d'équiper les personnes d'étiquettes radio et les bornes fixes de lecteurs RFID. Ce choix est fait en fonction de la taille de la zone à couvrir, du nombre des personnes à localiser et du coût prévu pour l'infrastructure. En approchant un mobile d'une borne équipée d'une radio étiquette RFID, celle-ci fournit la position géographique grâce à un échange de signaux radio. Il s'agit d'un système de localisation par proximité. Cela permet à un lecteur RFID de questionner les étiquettes et de recevoir leurs informations. On distingue les étiquettes passives et les étiquettes actives. Les étiquettes passives n'ont pas de source de courant et utilisent donc l'énergie des ondes émises par le lecteur RFID (devant être à proximité) pour s'activer et répondre. Les étiquettes actives ont une source de courant propre et peuvent donc être plus actives et indépendants [25].

2.6.3.3 RF-UWB : Ultra Wide Band

L'UWB est un nouveau type de radio sans fil. Il est caractérisé par une grande largeur de bande par rapport à la fréquence centrale des ondes émises. Il y a deux facteurs derrière le concept UWB : la bande passante relativement large et fréquence centrale relativement petite. La grande largeur de bande permet des résolutions temporelles précises et dans des systèmes bien architecturés une meilleure confidentialité. La basse fréquence centrale quant à elle devrait permettre un meilleur passage des ondes à travers les différents matériaux. Divers systèmes de

localisation ont été testés sur les radios UWB et semblent donner des résultats très prometteurs.

2.6.3.4 WiFi

Les signaux WiFi peuvent, eux aussi, être utilisés pour la localisation. Plusieurs arguments sont en faveur de l'utilisation des ondes WiFi pour la localisation. Le premier avantage concerne l'installation d'un système de localisation utilisant le WiFi puisqu'il ne nécessite essentiellement qu'une mise à jour logicielle.

La localisation par WiFi est réalisée généralement à l'aide du calcul de la puissance car cette métrique ne nécessite pas de modification des bornes existantes. La localisation à partir de la puissance du signal peut s'effectuer de deux manières différentes. La première consiste à utiliser un modèle de propagation pour calculer la distance qui sépare le mobile des bornes WiFi, pour ensuite estimer la position du mobile par trilatération. La seconde méthode est basée sur le principe de fingerprinting moyennant un calibrage préalable. Cette méthode nécessite la réalisation d'une base de données qui lie chaque position géographique du mobile à des valeurs de puissances reçues.

2.6.3.5 Protocole ZigBee

ZigBee est un protocole de haut niveau qui permet de mettre en place une communication entre des petites radios, avec une consommation énergétique réduite. Ce paramètre est important car ces radios sont souvent implantées sur des objets mobiles de type capteur sans fil. Ces capteurs possédant une durée de vie limitée, l'optimisation des coûts de communication est primordiale. ZigBee est basé sur le standard IEEE 802.15.4 pour des WPAN (Wireless Personal Area Networks).

Pour se référer à un mode de communication sans fil plus connu, le ZigBee est fortement inspiré de la technologie Bluetooth, mais en étant moins onéreux et plus simple à implémenter en terme de codage. En effet, les noeuds ZigBee sont en moyenne dix fois plus petits en taille de code [24].

2.6.3.6 Bluetooth

C'est une technologie radio destinée à simplifier les connexions entre les appareils électroniques. Elle a été conçue dans le but de remplacer les câbles entre les ordinateurs et les imprimantes, les scanners, les claviers, les souris, les téléphones portables, les autoradios et les appareils photo numériques. Du fait de sa faible consommation électrique, cette technologie est devenue le standard de raccordement courte distance sans fils.

Une autre méthode de positionnement par Bluetooth utilise les mesures RSSI (Range Signal Strength Indication) pour obtenir la distance d'un client à plusieurs points d'accès

Bluetooth à positions connues, puis des calculs de triangulation sont effectués afin d'estimer les coordonnées de la position du client.

Tchnologie	Remarque
Infrarouges	Doit être en ligne de vue inutilisable en lumière de soleil La portée varie entre 5-10m
Ultrasons	Pas d'obstacle La portée varie entre 1-10m
Radio Fréquence	Trés utile GPS : Sa portée varie entre 5-10m RFID : Sa portée varie entre 1-5m Cellulaire : Sa portée varie entre 50-100m Wifi : Sa portée varie entre 2-50m Bluetooth, ZigBee : La portée varie entre 2-10m
UWB Radio	Expérimentale La portée varie entre 6-10m

TABLE 2.3: Les technologies de localisation.

Dans le tableau 2.3 nous allon présenté les différentes technologies de localisation en précisant leur intervalle de porté et quelque remarques. D'après le tableau on conclu que le radio cellulaire a la meilleur porté par contre le RFID a une faible porté [26].

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'importance de la localisation, ainsi que les systèmes de localisation comme la combinaison de trois sous systèmes : l'estimation des distances/angles, le calcul de la position et enfin un algorithme de localisation. les différents technologies de signaux utilisés ont été abordées également.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de la méthode MinMax ainsi que l'amélioration de cette dernière.

CHAPITRE 3

AMÉLIORATION DE LA MÉTHODE MINMAX

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la problématique de la précision de localisation, les objectifs de notre travail et le système de localisation proposé. Nous allons comparer les méthodes MinMax et Centoïde par rapport à leur précision de localisation et leur consommation d'énergie. À la fin de ce chapitre nous allons étudier la méthode MinMax et présenter notre proposition pour améliorer la précision de localisation.

3.2 Problématique

Dans les réseaux de capteurs sans fil, les nœuds disposent de la faculté d'extraire, de traiter et de combiner des données, tout en offrant accès à celles-ci. Le défi de la localisation est d'estimer de manière fiable les positions des nœuds mobiles avec le minimum de ressources.

Les nœuds capteurs possèdent généralement des ressources très limitées. Ils possèdent de faibles processeurs et de petites mémoires, ce qui rend les grands calculs irréalisables. Par conséquent, un algorithme de localisation doit être simple et non complexe et cela en évitant les grands calculs qui entraînent d'une part une grande capacité de stockage en mémoire, et d'une autre part un temps d'exécution absurde.

En prenant en compte toutes ces considérations, nous pouvons constater que ce n'est pas toutes les méthodes de localisation présentées au chapitre 2 qui peuvent être utilisées dans les réseaux de capteurs sans fil d'une manière distribuée. En effet, pour pouvoir utiliser la méthode triangulation, il faut équiper le nœud capteur à localiser d'un matériel spécifique permettant de mesurer l'angle d'arrivée du signal pour estimer la position d'une cible à base d'un calcul géométrique. De même l'utilisation de la méthode multilatération nécessite un processeur puissant

et une capacité mémoire importante vue que l'implémentation de cette méthode fait souvent recours à l'utilisation de la résolution de système d'équation à base de calcul matriciel.

Même si ces deux méthodes donnent généralement une meilleure précision relativement aux autres méthodes, elles restent néanmoins compliquées à implémenter. Au contraire, les méthodes Centroïde et MinMax sont simples à implémenter, nécessitent moins d'espace mémoire, une consommation d'énergie réduite et leur temps d'exécution sont courts, mais leurs précisions de localisation sont moins intéressantes. Afin d'améliorer la précision de la méthode MinMax, dans le reste du chapitre, nous allons étudier cette méthode, ensuite expliquer les principes de notre proposition qui sera implémentée dans le chapitre 4.

3.3 Objectifs de notre travail

Notre objectif consiste à proposer un système de localisation basé sur RSSI pour localiser un nœud mobile dans un endroit précis à base d'un réseau de capteurs sans fil. Nous allons utiliser le système d'exploitation Contiki pour implémenter et simuler notre système de localisation et le choix de Contiki n'est pas fortuit, la plupart des primitives nécessaires à l'émulation d'un réseau de capteurs sont données par ce système.

Notre système de localisation utilise la méthode MinMax qui est l'une des méthodologies de localisation les plus connues qui utilise la puissance du signal de réception (RSSI) pour calculer la position d'un mobile utilisant comme paramètre les informations (coordonnée) provenant du réseau de capteur sans fils. On évalue la précision de la localisation en fonction :

- Du nombre de nœud (ancres + mobile).
- De la consommation d'énergie.
- D'un algorithme : MinMax et son amélioration pour comparer nos résultats.
- Du Temps de transmission pour avoir le maximum de message, c'est à dire, le maximum de coordonnées.

3.4 Système de localisation proposé

Notre système est composé de trois éléments comme tout autre système de localisation qui sont :

- **Technologie :**

Nous utilisons les réseaux de capteurs qui communiquent avec la technologie Zigbee (IEEE 802.15.4). ZigBee offre des débits de données moindres, mais sa très faible consommation d'énergie et ses coûts de production très bas en font une candidate idéale pour la domotique

ou les matériels de type capteur. Nous supposons que ces capteurs représentent des objets de la vie quotidienne dotés de dispositifs qui permettent d'interagir avec l'environnement.

- **Métrique** : on utilisera la puissance du signal reçu (RSSI) [13] pour l'estimation de distance entre le nœud émetteur et le nœud récepteur.
- **Méthode de la localisation** : pour calculer la position du nœud à partir des distances, on utilisera deux différentes méthodes : la méthode MinMax et la méthode Centroïde qui sont réputées pour être précises et simples à implémenter.

3.5 Étude comparative des deux méthodes MinMax et Centroïde

Afin de pouvoir comparer les deux approches nous avons effectué des tests de simulation pour dans laquelle nous intéresserons essentiellement à la métrique précision de localisation lors d'estimation des distances et au nombre de message reçu par phase, à l'égard d'une étude de l'évolution de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs lors de nos simulations. la Figure 3.1 illustre les résultats de simulation des deux méthodes pour une topologie de 10 ancres.

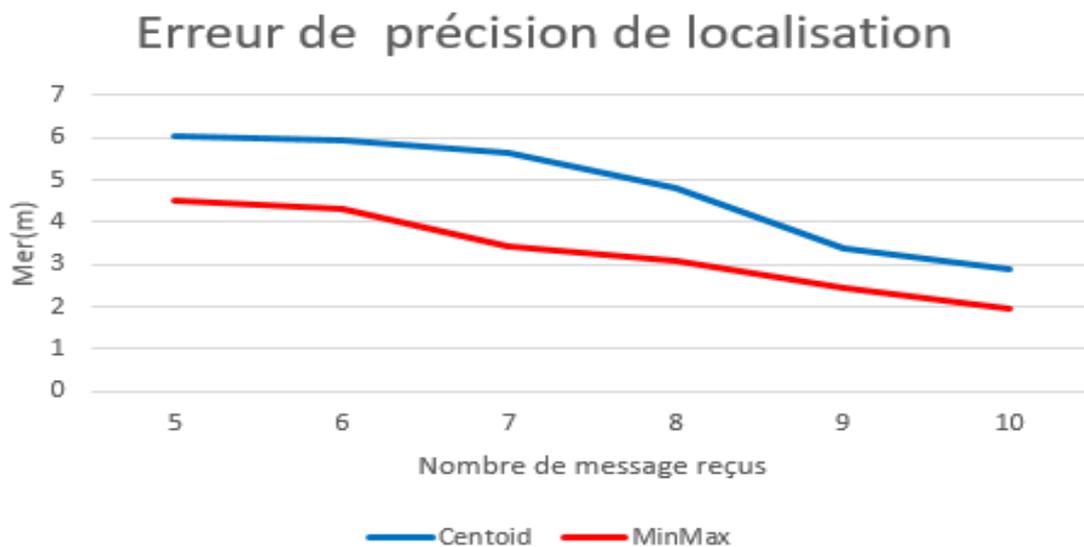


FIGURE 3.1 – Comparaison d'erreur de précision entre Centroïde et MinMax pour dix capteurs.

- Avec une topologie de 10 ancres on remarque que pour la méthode MinMax le taux d'erreur varie entre 4.5 m et 1.95 m, par contre dans la méthode centroïde le taux d'erreur varie entre 6.05 m et 2.95 m. Lorsque le nombre de message reçu par phases augmente le taux moyen d'erreur diminue. Dans ce cas nous déduisons que la méthode

MinMax est plus précise que la méthode centroïde.

La Figure 3.2 illustre les résultats de simulation des deux méthodes pour cinq topologie avec un nombre de : 3, 5, 10, 20, 30 capteurs ancres. Représentant la variation de la moyenne du taux d'erreur pour chaque topologie en fonction de nombre d'ancre.

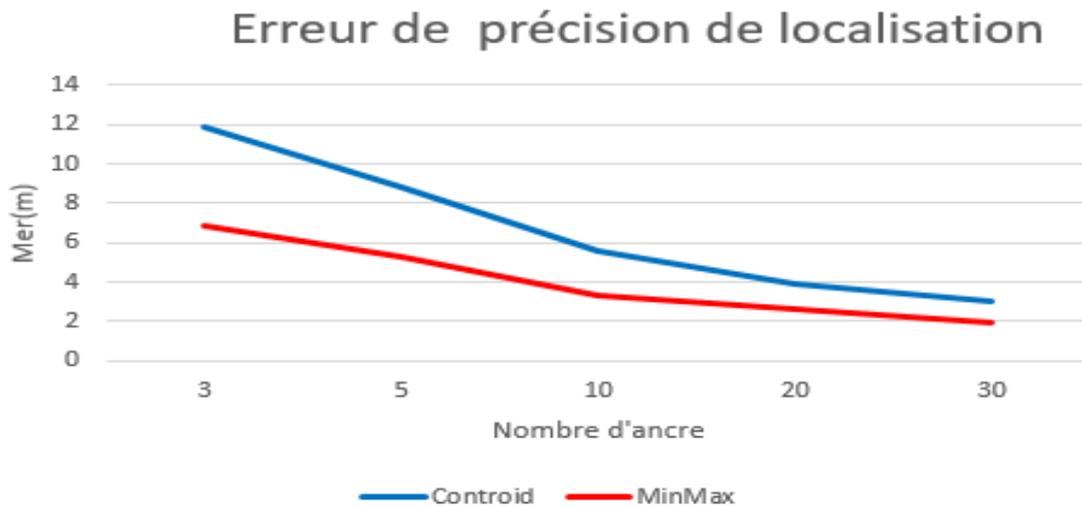


FIGURE 3.2 – Comparaison d'erreur de précision entre Centroïde et MinMax en fonction du nombre d'ancre.

- pour une topologie de trois ancres : le taux d'erreur trouvé avec la méthode MinMax est à 6.86 m et celui trouvé avec Centroïde est à 12 m, une différence de précision de 5.14 m entre les deux méthodes.
- pour une topologie de cinq ancres : le taux d'erreur trouvé avec la méthode MinMax est à 5.28 m et celui trouvé avec Centroïde est à 8.31 m, une différence de précision de 3.03 m entre les deux méthodes.
- pour une topologie de dix ancres : le taux d'erreur trouvé avec la méthode MinMax est à 3.3 m et celui trouvé avec Centroïde est à 5.6 m, une différence de précision de 2.3 m entre les deux méthodes.
- pour une topologie de vingt ancres : le taux d'erreur trouvé avec la méthode MinMax est à 2.67 m et celui trouvé avec Centroïde est à 3.95 m, une différence de précision de 1.28 m entre les deux méthodes.

- pour une topologie de trente ancrés : le taux d'erreur trouvé avec la méthode MinMax est à 1.9 m et celui trouvé avec Centroïde est à 3 m, avec une différence de précision de 1.1 m entre les deux méthodes.

Après l'analyse des résultats obtenus on remarque que en augmentant le nombre d'ancre le taux d'erreur diminue pour les deux méthodes ce qui a permis de donner plus de précision dans le calcul de la position, cependant MinMax reste la meilleure à donner plus de précision dans tous les cas traités.

En tenant compte des résultats obtenus lors de nos simulations, nous pouvons conclure que la précision de localisation donnée avec la méthode MinMax est meilleure par rapport à celle donnée avec la méthode Centroïde.

Étude de l'évolution de la consommation d'énergie :

Afin d'étudier le comportement de la consommation d'énergie, on s'intéresse seulement à l'énergie consommée lors d'exécution (INT) des deux méthodes, c'est à dire qu'on ne prend pas en considération les énergies consommées lors de l'activation des nœuds capteurs, de transmission et de réception de données, car celles-ci sont équivalentes pour un même type de nœuds capteurs.

La variation de la consommation d'énergie est représentée dans les graphiques de la figure 3.3.

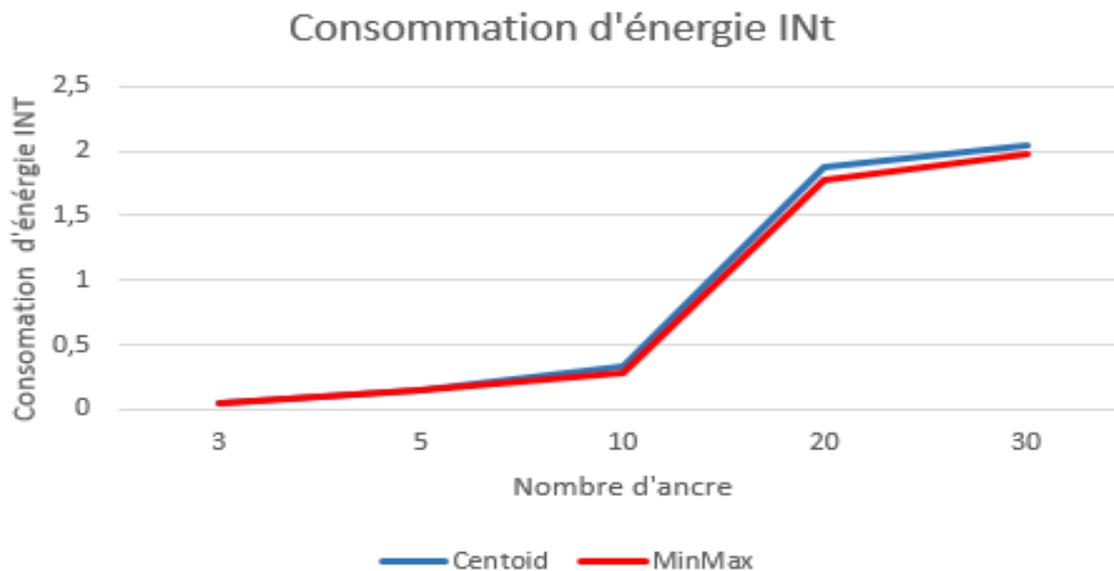


FIGURE 3.3 – Comparaison de consommation de l'énergie entre MinMax et centroïde.

Dans la figures 3.3 traitant la consommation d'énergie, on remarque que le changement du nombre d'ancre a un impact sur la consommation d'énergie, en effet les deux courbes confirment que plus le nombre d'ancre est élevé plus la consommation d'énergie augmente pour les deux méthodes.

Nous avons remarqué aussi à travers nos simulation que la consommation d'énergie pour les deux méthodes *MinMax* et *centroïde* sont relativement équivalentes pour des différentes topologies c'est ce que nous montre les graphiques de la figure 3.3.

En tenant compte des résultats obtenues précédemment pour les deux méthodes *Centoïde* et *MinMax*, on voit bien que la précision de la localisation de ces méthodes et leurs consommation d'énergie dépend de plusieurs paramètres tel que : la position de nœud mobile par rapport aux nœuds ancrés, le nombre de messages reçus et la disposition des ancrés desquelles le nœud mobile reçoit les messages.

D'après les résultats nous pouvons conclure que la précision de localisation de la méthode *MinMax* est plus intéressante que celle de *Centoïde* et leurs consommation d'énergie ont presque le même comportement.

3.6 Étude de la méthode *MinMax*

Afin d'étudier la méthode *MinMax*, nous allons particulièrement prendre en considération deux cas, dans le premier on met le nœud au milieu des nœuds capteurs, et dans le second, le nœud mobile est à l'extérieure de l'ensemble des nœuds capteurs.

- Cas 1 : le nœud mobile est au milieu des nœuds ancrés. La Figure 3.4 illustre l'architecture de cette exemple :

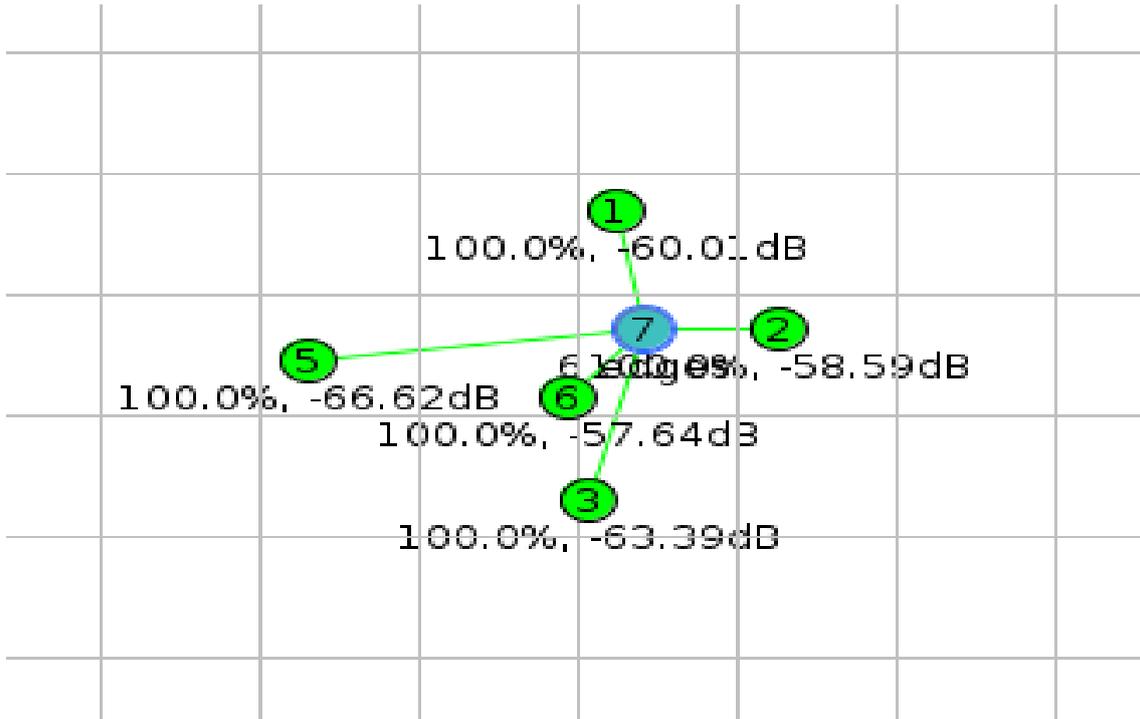


FIGURE 3.4 – Architecture du réseau : le nœud mobile à l’intérieur des nœud ancres.

- Cas 2 : le nœud mobile est à l’extérieur des nœuds ancres. La Figure 3.5 illustre l’architecture de cette exemple :

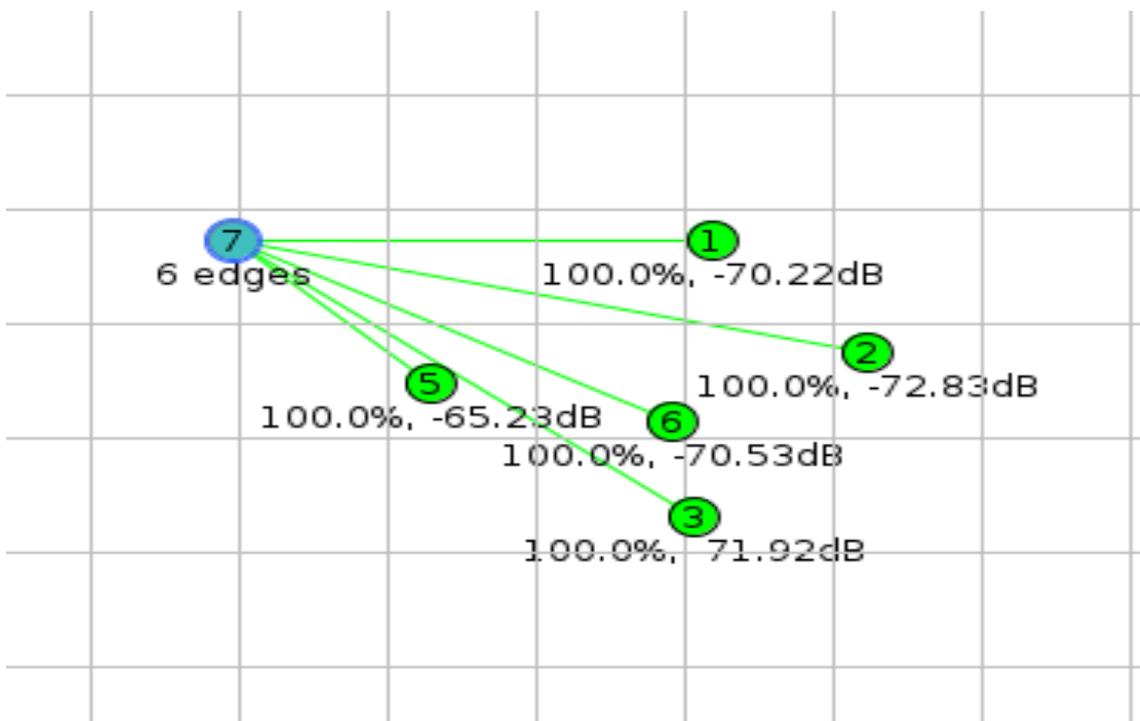


FIGURE 3.5 – Architecture du réseau : le nœud mobile à l’extérieur des nœuds ancres.

3.6.1 Évaluation des résultats

Nous avons effectué des tests de simulation pour une topologies de 5 ancre pour les deux cas précédents. La Figure 3.6 illustre les résultats de comparaison entre les deux cas pour 5 ancre :

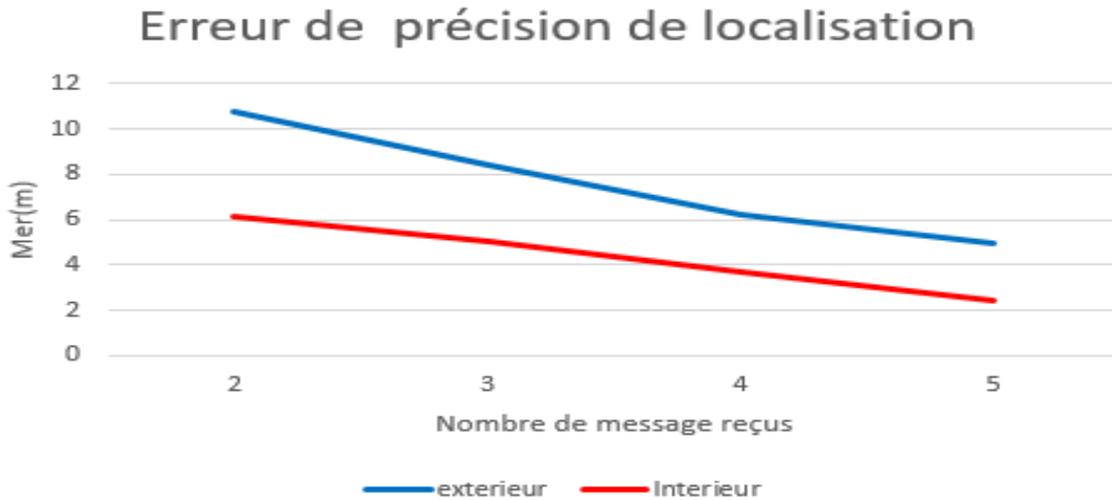


FIGURE 3.6 – Comparaison de l’erreur de localisation entre les deux cas.

Pour le cas 1, l’erreur varie entre 6.05 m et 2 m, par contre dans le cas 2, le taux d’erreur varie entre 11 m et 5 m. Le nombre de message reçu augmente le taux d’erreur diminue pour les deux exemples. Cependant nous déduisons que le cas où le nœud mobile est à l’extérieur des nœuds ancrés donne plus de précision par rapport au deuxième cas où le nœud mobile est à l’extérieur des ancrés.

Dans ce qui suit nous proposons une amélioration pour la méthode MinMax pour avoir une localisation plus précise par rapport à la précédente.

3.6.2 Améliorations de la méthode MinMax

Notre proposition consiste à calculer une nouvelle position du nœud mobile en comparant la distance minimale d_{\min} donnée par le RSSI entre la position réelle et les ancrés, avec la distance entre les coordonnées de la position (x_g, y_g) estimé par la méthode MinMax et l’ancré qui a donné la distance d_{\min} . La distance d_{\min} est donnée comme suit :

$$d_{\min} = \min(d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n) \quad (3.1)$$

où n est le nombre de nœuds ancrés pour lequel le nœud cible a reçu le signal RSSI.

Soit (x_{\min}, y_{\min}) les coordonnées de la position correspondant au nœud ancre avec la distance d_{\min} .

Le minimum des distances euclidiennes entre (x_g, y_g) et les coordonnées (x_{min}, y_{min}) est exprimé par la formule 3.2

$$d_f = \sqrt{(x_g - x_{min})^2 + (y_g - y_{min})^2} \tag{3.2}$$

A, B, C sont des ancres.

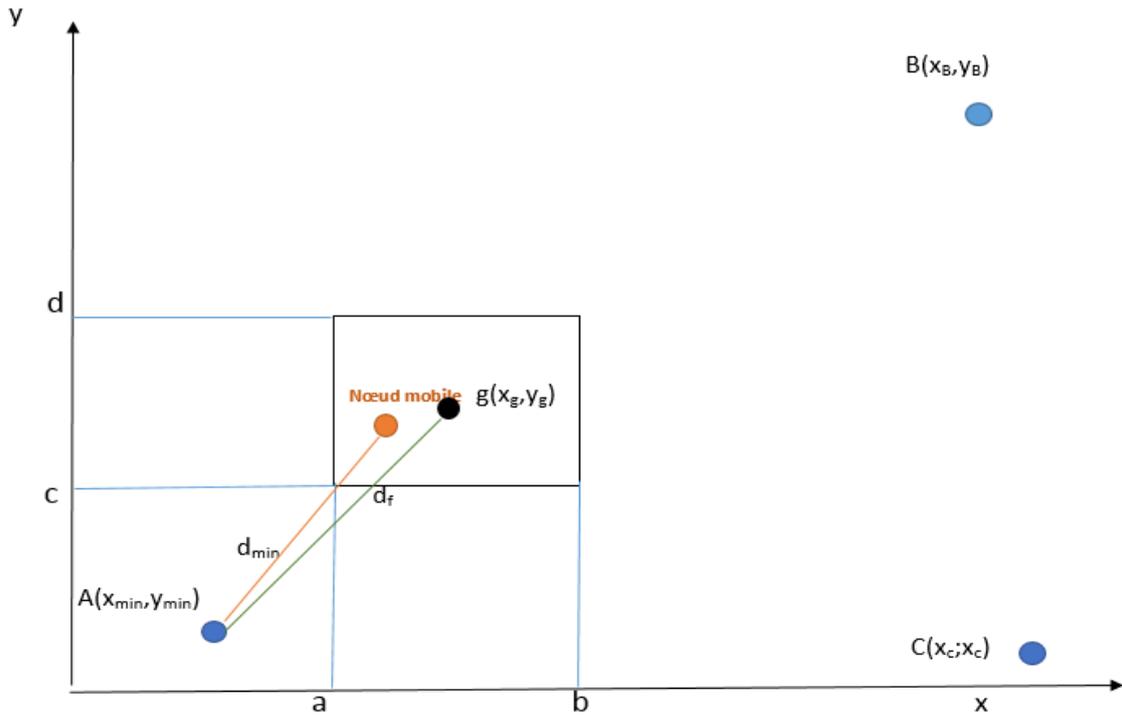


FIGURE 3.7 – Principe de la proposition d’amélioration.

Après avoir calculé les deux distances d_{min} et d_f on va les comparer.

Le principe de notre proposition consiste à rapprocher la distance d_f de la distance d_{min} selon la disposition des ancres et (x_g, y_g) .

La Figure 3.7 montre un cas particulier des positions des ancres et la position estimée par MinMax ainsi que les distances des d_{min} et d_f .

L’algorithme donne le fonctionnement de notre proposition dans le cadre général.

Algorithme MinMax modifié

entrées :

$x[g], y[g], x[\min], y[\min], a, b, c, d, d[\min], d[f]$: réel ;

// $x[g], y[g]$ coordonnées de la position calculé avec MinMax.

// $x[\min], y[\min]$ les coordonnées de la position correspondant au nœud ancre avec la distance d_{\min} .

sorties :

$x[n], y[n]$: reel ;

// les coordonnées de la nouvelle position estimé.

debut

si ($y[g] > y[\min]$)

 si ($x[g] > x[\min]$)

 si ($d[\min] < d[f]$)

$x[n] = (5*a + 4*b) / 9$;

$y[n] = (5*c + 4*d) / 9$;

 finsi

 si ($d[\min] > d[f]$)

$x[n] = (4*a + 5*b) / 9$;

$y[n] = (4*c + 5*d) / 9$;

 finsi

 finsi

 si ($x[g] < x[\min]$)

 si ($d[\min] < d[f]$)

$x[n] = (4*a + 5*b) / 9$;

$y[n] = (5*c + 4*d) / 9$;

 finsi

 si ($d[\min] > d[f]$)

$x[n] = (5*a + 4*b) / 9$;

$y[n] = (4*c + 5*d) / 9$;

 finsi

 finsi

finsi

fin.

si ($y[g] < y[\min]$)

 si ($x[g] > x[\min]$)

 si ($d[\min] < d[f]$)

```
        x[n]=(5*a+4*b)/9;
        y[n]=(4*c+5*d)/9;
    finsi
    si (d[min]>d[f])
        x[n]=(4*a+5*b)/9;
        y[n]=(5*c+4*d)/9;
    finsi
finsi
si (x[g]<x[min])
    si (d[min]<d[f])
        x[n]=(4*a+5*b)/9;
        y[n]=(4*c+5*d)/9;
    finsi
    si (d[min]>d[f])
        x[n]=(5*a+4*b)/9;
        y[n]=(5*c+4*d)/9;
    finsi
finsi
finsi
fin.
```

3.7 conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé la problématique de la localisation dans les réseaux de capteurs sans fil, nous avons présenter un système de localisation composé de trois éléments essentiels, la technologie ZigBee, la métrique RSSI pour l'estimation de la distance et deux méthodes de localisation Centoïde et MinMax. Nous avons étudié la méthode MinMax et les différents critères pour avoir plus de précision lors de la localisation dans les réseaux de capteur sans fil ainsi on a étudié leur consommation d'énergie puis nous avons introduit une approche pour améliorer la méthode MinMax que nous allons implémenter et tester dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

IMPLÉMENTATION ET SIMULATION

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente les outils d'implémentation et de simulation ContikiOS et Cooja, à l'égard d'une présentation détaillée sur l'implémentation des deux méthodes de localisation MinMax et Centoïde pour calculer la position d'un nœud mobile. Puis on va implémenter notre amélioration de MinMax définis dans le chapitre précédent pour calculer la position la plus proche à la position réel d'un nœud mobile.

4.2 Outils d'implémentation et de simulation

Les réseaux de capteurs sont considérés parmi les systèmes à ressources limitées. De ce fait, les outils logiciels conçus aux ordinateurs ne sont plus adaptables à ce type de systèmes. Il y a des outils logiciels légers qui sont dédiés spécialement aux réseaux de capteurs, que ce soient des systèmes d'exploitations ou des langages de programmation.

Dans cette partie, on se base sur la présentation du système d'exploitation Contiki qui est considéré comme un système d'exploitation complet et réputé. Puis, une étude détaillée de simulateurs Cooja est présentée.

4.2.1 Choix de ContikiOS

Contiki est un système d'exploitation open-source, multitâches, léger, générique et flexible pour les capteurs des réseaux sans fils.

Ce système a été développé par un groupe de développeurs de l'industrie et du monde universitaire par ADAM Dunkels de l'institut suédois d'informatique en 2002 [30]. Destiné à être

embarqué dans des capteurs miniatures ne disposant généralement que de ressources limitées, Contiki a présenté l'idée d'utiliser la communication IP dans des réseaux de capteurs à basse consommation.

Contiki est constitué d'un noyau, de bibliothèques, d'un ordonnanceur et d'un jeu de processus. Comme tout système d'exploitation, son rôle est de gérer les ressources physiques telles que le processeur, la mémoire, les périphériques informatiques. Il fournit ensuite aux applications informatiques des interfaces permettant d'utiliser ces ressources conçu pour les modules de capteurs sans fil.

Nous avons choisi Contiki car il présente les avantages suivants :

- Simple.
- Open source.
- Programmé en langage c.
- Réduction de la consommation d'énergie.

4.2.2 Simulateur Cooja

Cooja est un simulateur fournit par contiki, permettant d'émuler des nœuds et de charger un programme compilé. Ceci est particulièrement utile pour tester les programmes avant de les mettre dans la mémoire flash des nœuds réels. Il permet ensuite de simuler les connexions réseaux et d'interagir avec les capteurs. Cet outil permet aux développeurs de tester les applications à moindre coût. Parmi les caractéristiques de Cooja nous citons [31] :

- Cooja combine des simulations de capteur matériel de nœud et simulation du comportement de haut niveau en une seule simulation.
- Cooja est flexible et extensible en ce que tous les niveaux du système peuvent être modifiés ou remplacés.
- Cooja est une application Java, toutes les interactions avec Code Contiki se fait à travers Java Native Interface (JNI).
- Cooja est essentiellement un simulateur de niveau de code pour réseaux constitués de nœuds exécutant Contiki OS.

La Figure 3.1 illustre l'interface Cooja. L'interface du simulateur Cooja est composée de plusieurs fenêtres :

- **La fenêtre Network** : en haut à droite de l'écran, dans cette fenêtre s'affiche la représentation graphique du réseau, elle nous montre tous les nœuds dans le réseau simulé.
- **La fenêtre Timeline** : en bas de l'écran, nous affiche tous les événements de communication dans la simulation dans le temps, pour savoir ce qui se passe dans le réseau.

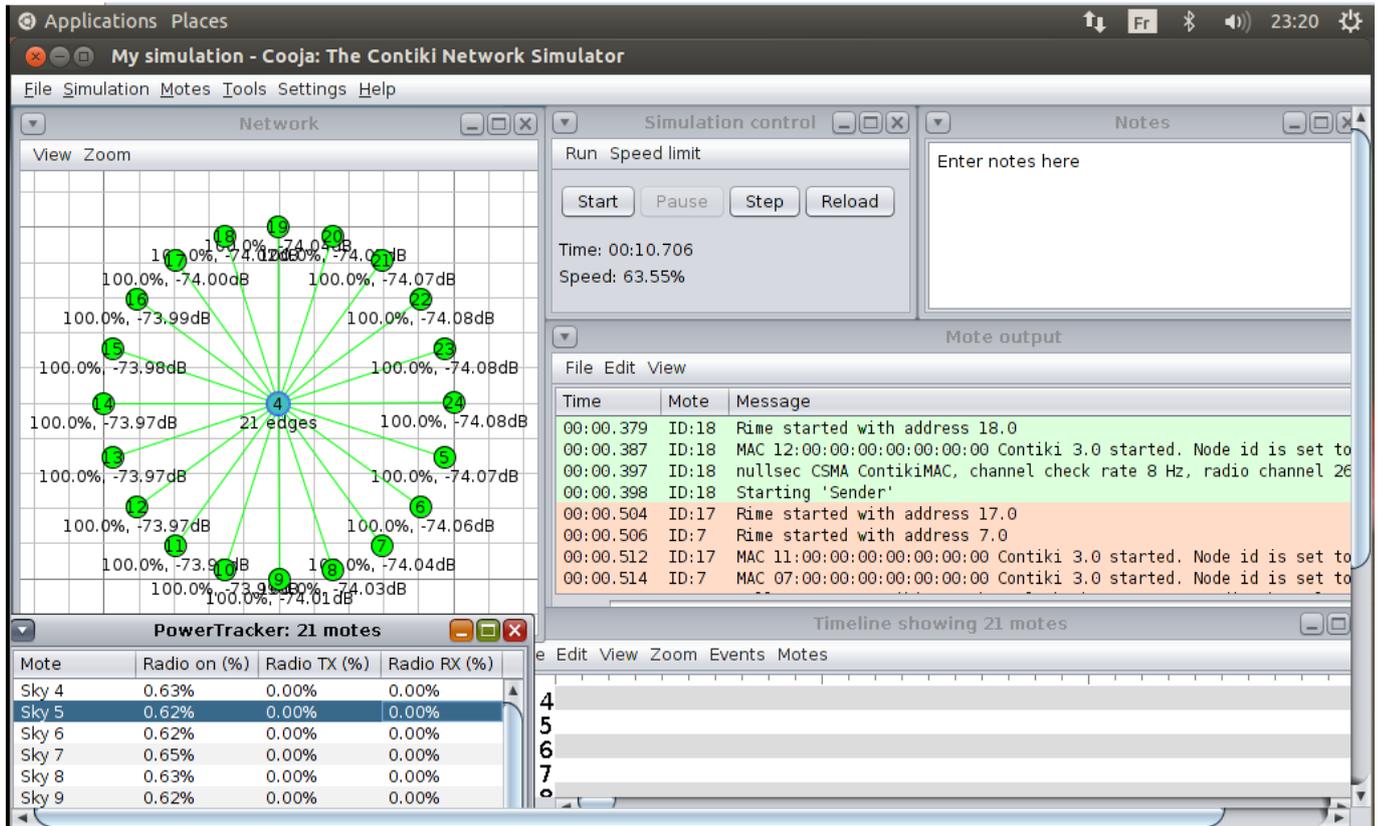


FIGURE 4.1 – Interface graphique du simulateur Cooja

- **La fenêtre Simulation contrôle** : responsable du contrôle de la simulation où nous pouvons lancer, mettre en pause et recharger notre simulation composée de quatre boutons (start, pause, step et reload).
- **La fenêtre Notes** : en haut à droite de l'écran, dans cette fenêtre on peut mettre des notes et remarques concernant notre simulation.
- **La fenêtre Mote Output** : Situé sur le côté droit de l'écran, c'est dans cette partie que les sorties des capteurs sont affichées, elle contient un champ de texte qui permet d'entrer un filtre pour cibler un capteur ou un type de message en particulier, cette fenêtre est composée de trois colonnes (time, mot et message).
 - **Time** : désigne le temps réel.
 - **Mot** : c'est l'identifiant du capteur.
 - **Message** : type de message échangé.

Lorsqu'on démarre la fenêtre de simulation, dans la colonne message on obtient l'affichage suivant :

- **La première ligne** : affiche l'adresse Rime du nœud.
- **La deuxième ligne** : affiche l'adresse MAC du nœud ainsi que son identifiant.
- **La troisième ligne** : affiche le mécanisme par défaut ContikiMac, la couche MAC est

responsable pour éviter des collisions (contrôle d'erreur, contrôle de flux) au moyen de la radio et de retransmission des paquets, lorsqu'une perte de paquet ou bien d'une collision est produite.

- **La quatrième ligne** : indique le nom du processus démarré.

4.2.3 Interface de développement

Contiki propose un environnement de développement complet et fonctionnel nommé Instant Contiki, téléchargeable sous la forme d'une machine virtuelle. Cette machine virtuelle peut être lancée par VMware Workstation Pro. Cette dernière contient un environnement de développement Eclipse et tout le code source de Contiki. Elle contient également le simulateur Cooja avec plusieurs exemples de simulations [32].

4.3 Simulation

4.3.1 Scénario de simulation

Pour réaliser nos simulations, nous allons déployer un ensemble de capteur dans un environnement où se déplace un mobile qui souhaite connaître sa position à chaque instant. Dans notre cas nous avons n capteurs fixes (ancres) dans leurs position est connues au paravent (X_i, Y_i) tel que $i=1..n$, et un nœud mobile qui cherche à estimer sa position à l'aide de ces ancres. Les simulations se déroulent selon les étapes suivantes :

- Le nœud mobile envoi un message broadcast ("Hello",Dt) vers tout les nœuds ancres du réseau de capteurs où Dt et le temps nécessaire à un nœud ancre pour répondre au nœud mobile.
- Les nœuds ancres répondent au nœud mobiles par un message unicast indiquant leur positions (X_i, Y_i) .
- Le nœud mobile utilise la méthode MinMax qui utilise la position des ancres et la puissance du signal reçus (RSSI) pour calculer sa position ou bien la méthode Controïde qui a besoin de connaître que les positions des ancres.

4.4 Implémentation des méthodes

Pour la récupération des positions des capteurs déployés dans l'interface de simulateur Cooja, nous avons apporté quelque modifications dans le code source de Contiki. Une fois les positions des capteurs sont connue nous pourrons les utiliser pour les méthodes de localisation

MinMax et centroïde. De plus pour pouvoir calculer les distances en fonction de RSSI, nous devons connaître comment le signal RSSI varie dans l'environnement de simulation.

4.4.1 Calcul de la distance en fonction de RSSI

On utilise la mesure RSSI reçue par le nœud mobile pour calculer la distance entre le nœud mobile et le nœud ancre. Il existe un modèle linéaire dans le simulateur Cooja de Contiki utilisé pour donner l'atténuation de puissance du signal en fonction de la distance (Multi-path Ray-tracer Medium (MRM)). Par contre la formule utilisée dans ce modèle n'est pas donnée dans la documentation de Cooja, donc pour convertir les mesures RSSI en distance on applique la Formule 4.1.

$$d = 10^{c - \frac{\text{RSSI}}{20}} \quad (4.1)$$

Où

$c = -2$ est une constante.

4.4.2 Pseudo-code de la méthode MinMax

MinMax est une méthode de localisation. Son but est de permettre aux capteurs de trouver leur position à l'aide des positions connues des ancres et des distances entre ces ancres et le nœud à localiser. Afin de calculer la distance entre le nœud mobile et le nœud ancre, il faut utiliser la mesure RSSI reçue par le nœud inconnu. Dans cette section nous présentons le Pseudo-code de la méthodes MinMax.

Pour l'implémentation de la méthode MinMax, on utilise le pseudo-code qui sera appelé dans l'algorithme 4 du nœud mobile :

<p>Algorithme 1</p> <p>Algorithme MinMax</p> <p>entrées :</p> <p> tableau coordx[nbmsg] : reel ; // coordonnées des ancres.</p> <p> tableau coordy[nbmsg] : reel ; tableau t_dist[nbmsg] : reel ; //Tableau ds distances.</p> <p>sorties :</p> <p> x, y : reel ; // coordonnées de la position calculée.</p>
--

```
debut
  Tableau t_max[];
  Tableau t_min[];
  max, min, j, a, b, c, dd, ii, k :reel;
  si (nbmsg<2)
    ecrire("nombre de messages insuffisant", nbmsg);
  sinon
    pour (ii=0; ii<nbmsg; ii++)
      t_max[j] = coord_x [ii]- t_dist[k];
      t_min[j] = coord_x [ii]+ t_dist[k];
      j=j++; k=k++;
    fin pour
    ii=0; j=0; k=0;
    min = t_min[0];
    max=t_max[0];
    pour (ii=1; ii<nbmsg; ii++)
      si (max<t_max[ii])
        max=t_max[ii];
      fin si;
      si (min>t_min[ii])
        min=t_min[ii];
      fin si
    finpour
    a=max; b=min; ii=0; j=0; k=0;
    pour (ii=0; ii<nbmsg; ii++)
      t_max[j]=coord_y[ii] - t_dist[k];
      t_min[j]=coord_y [ii]+ t_dist[k];
      j=j+1; k=k++;
    finpour
    min=t_min[j];
    max=t_max[j];
    pour (ii=1; ii<nbmsg; ii++)
      si (max<t_max[j])
        max=t_max[j];
      fin si
      si (min>t_min[j])
        min=t_min[j];
```

```
        finsi
    finpour ;
    c=max ;
    dd=min ;
    xx=(a+b)/2 ;
    yy=(c+dd)/2 ;
finsi
fin.
```

4.4.3 Pseudo-code de la méthode Centroïde

Centroïde est une méthode relativement simple et intuitive. Son but est de permettre au capteur mobile de trouver sa position à l'aide des positions connues des ancres. Cette méthode ne calcule jamais de distances entre voisins. Elles utilisent d'autres informations telles que la connectivité pour identifier la position des nœuds.

L'algorithme 2 présente le pseudo-code de la méthode Centroïde.

Algorithme 2
<p>Algorithme centroid</p> <p>entrées :</p> <p> tableau coordx[nbmsg] : reel ;</p> <p>// coordonnées des ancres</p> <p> tableau coordy[nbmsg] : reel ;</p> <p>sorties :</p> <p> x, y : reel ;</p>

```

// coordonnées de la position calculée
debut
  si (nbmsg<2)
    ecrire("nombre de messages insuffisant", nbmsg);
  sinon
    pour i allant de 1 à nbmsg
      x=x+coordx[i];
      y=y+coordy[i];
    finpour
    x=x/nbmsg;
    y=y/nbmsg;
  finsi
fin

```

4.4.4 Algorithmes des programmes à mettre dans les nœuds

Les deux algorithmes 3 et 4 définissent la communication entre le nœud ancre et le nœud mobile qui désire connaître sa position, le nœuds mobile envoie un message broadcast (hello+Dt). Le nœud ancre qui reçoit le message lui répond par un message unicast, dans une durée Dt par l'envoi de ces coordonnées. En fin, le nœud mobile utilise l'une des méthodes implémentées (MinMax et Centroïde) afin d'estimer sa position.

- L'algorithme 3 présente le pseudo-code à mettre dans nœud_ancre.

Algorithme 3

Algorithme nœud_ancre

```

debut
  clock_time interval, Dt, temps_Ack;
  num : entier;
  reçoit : booleen;
  Ack : booleen;
  Tantque(1) faire
    si reçoit "hello"+Dt alors
      id_addr=id_noeud();
//récupérer leur identifiant
      coord_xx=loc_x();
      coord_yy=loc_y();
//récupérer leur coordonnée x et y

```

```

        unicast(id_addr, coord_xx, coord_yy, num);
//envoyer un message unicast
        num++;
        attendre(interval);
        si reçoit "Ack" alors
            attendre(interval-temps_Ack);
            unicast(id_addr, coord_xx, coord_yy, num);
//renvoyer le message s'il n pas reçu un acquittement
        sinon
            attendre(interval-temps_Ack);
//attendre pendant un intervalle de temps pour envoyer un autre message
        finsi
    finsi
fin Tantque
fin.
```

- L’algorithme 4 présente le pseudo-code à mettre dans le nœud mobile, il fait appel au algorithme 1 et 2.

Algorithme 4

```

Algorithme nœud_mobile;
debut
entrées :
    Tableau coord[] : reel;
    Tableau dist[] : reel;
    interval, Dt :clock_time;
    nbmsg : entier;
Tantque (1) faire
    broadcast("Hello",Dt);
    attendre(interval);
    Tantque (inteval>0)
        si num_message=num alor
            dist[i]=distance_rssi(i);
//calcule des distances à partir de rssi en utilisant la Formule précédente
            coord[i]=coordonnée_xy(ancree[i]);
//récupérer les coordonnées de l’ancree
        finsi
    fin Tantque
```

```

centroid(coord, dist, nbmsg);
//appel_méthode()
fin Tantque
fin.

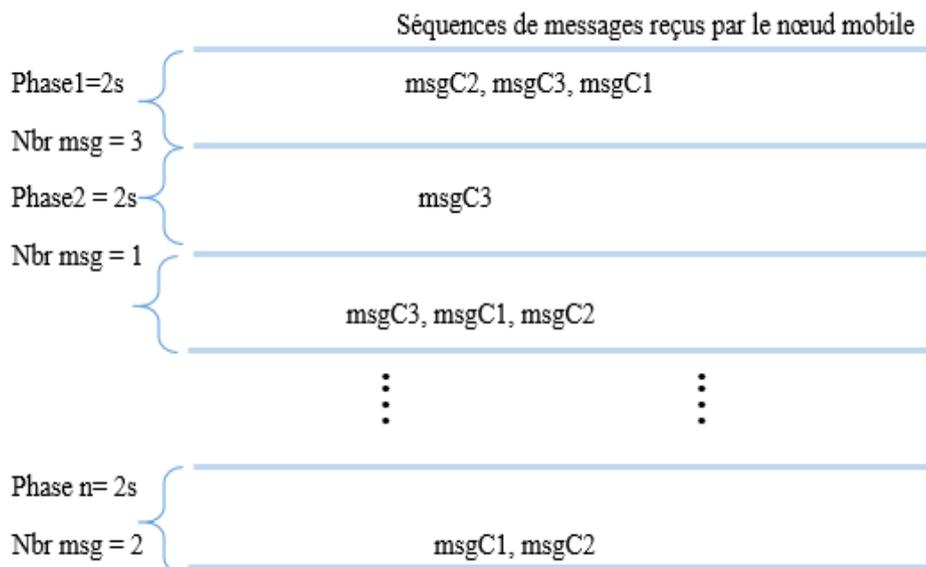
```

4.4.5 Tests de simulation

Les tests ont été effectués avec cinq topologie, ils contiennent respectivement 3, 5, 10, 20, 30 capteurs ancrés, ces cinq tests ont été effectués en un temps de retransmission de (2s, 2s, 2.5s, 3.5s, 4.5s respectivement). Nous nous intéressons aux résultats calculés, pour chaque algorithme, on calcule le nombre de messages, le nombre de messages reçus par le mobile et l'erreur qui est, en fait, la distance entre le point réel et le point calculé.

Nombre de message : Nombre de messages reçus par le mobile dans un intervalle connu (phase) de temps où le mobile cherche à calculer sa position.

Exemple : Prenons le cas de trois capteurs ancrés et le mobile, les capteurs ancrés envoient à chaque intervalle de temps (phase) un message unicast. Un exemple de suite de messages reçus par le mobile est représenté par la Figure(4.1) : D'après la figure, durant chaque deux secondes



Msg C_i : le message envoyé par l'ancre i vers le mobile avec $i = \{1, 2, 3\}$.

Nbr msg : c'est le nombre de messages reçus par le mobile pendant une phase.

FIGURE 4.2 – La suite des messages reçus par le mobile

(séparer par des lignes dans la figure), le mobile reçoit un certain nombre de messages (soit 0, 1, 2 ou bien 3). Dans la phase une, le mobile a reçu trois messages venus de trois ancres par

contre dans la phase deux il n'a reçu qu'un seul message.

Taux de réception du nombre de message par le mobile : c'est la moyenne du nombre de fois ou le mobile a reçus un nombre précis de message durant une phase. Pour calculer le taux reprenons l'exemple précédent :

Taux de réception du nombre de message par le mobile = $(\mathbf{nbf} * 100)/60$.

Où

- **nbf** : nombre de phase dans les quelles le mobile a reçus le même nombre de messages.
- **60** : nombre totale de phase pendant la période de simulation.

Er : L'erreur est définie comme étant la distance euclidienne entre les coordonnées réel du nœud et celle estimées par les algorithmes de localisation. La formule Er est définie comme suit :

$$Er = \sqrt{(x_r - x_e)^2 + (y_r - y_e)^2} \quad (4.2)$$

avec

x_r, y_r : les coordonnées des positions réel d'un nœud mobile.

x_e, y_e : les coordonnées des positions du nœud mobile calculées par la méthode.

MEr : c'est la moyenne de distance qui sépare la position réelle du mobile avec la position estimée par l'une des méthodes, dans le cas où il a reçus le même nombre de messages durant la période de simulation avec des distances différentes MEr.

$$MEr = \sum_{i=1}^{\mathbf{nbf}} Er/\mathbf{nbf} \quad (4.3)$$

4.5 Réalisation des tests

Les résultats obtenus lors de la réalisation des tests représentés dans les graphiques des Figures 4.3 et 4.4 :

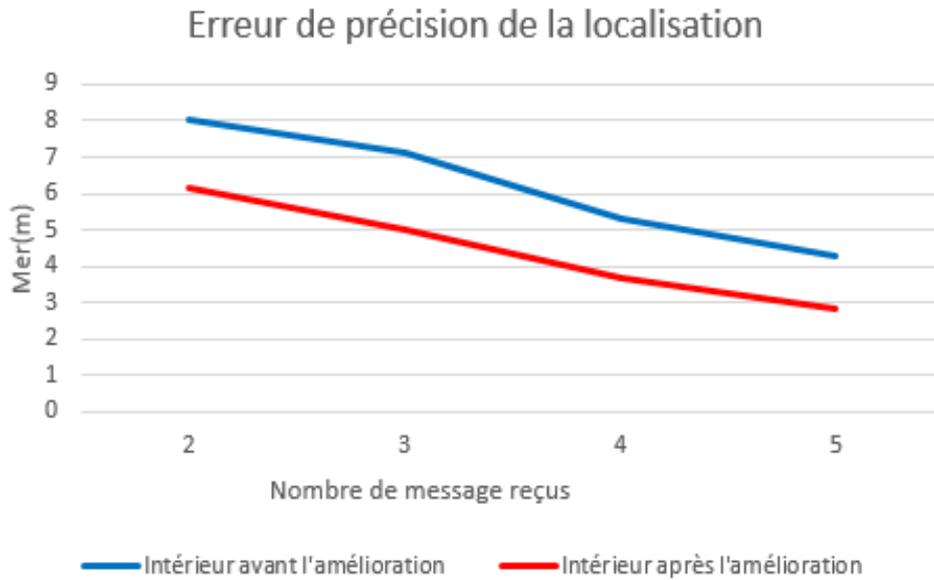


FIGURE 4.3 – comparaison d’erreur de précision obtenu avec MinMax et MinMax modifié : le nœud mobile est à l’intérieur des ancrés

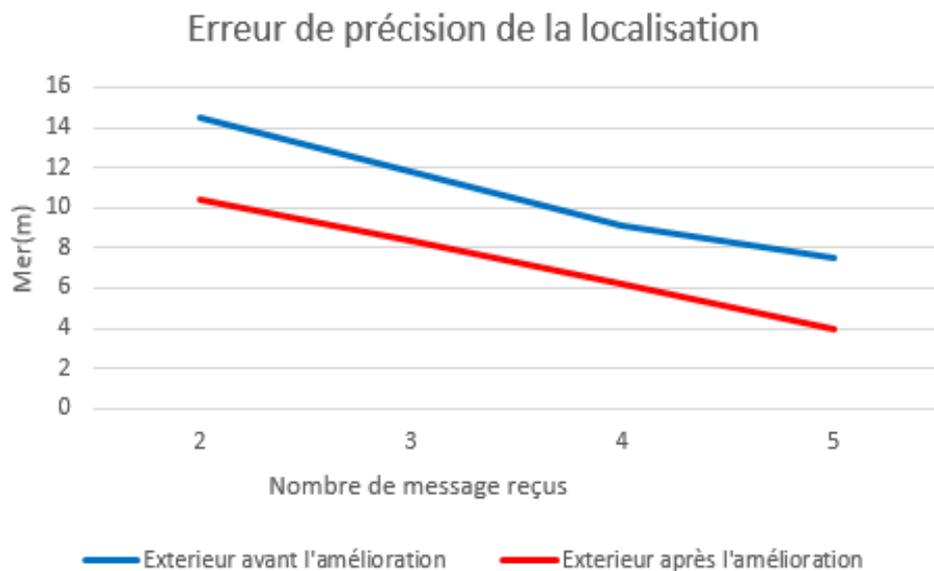


FIGURE 4.4 – comparaison d’erreur de précision obtenu avec MinMax et MinMax modifié : le nœud mobile est à l’extérieur des ancrés

D’après les deux Figures 4.3 et 4.4 illustrant l’erreur de précision en fonction de nombre de message reçu par phase, nous remarquons que le taux d’erreur de précision obtenu avec notre solution proposée est moins intéressant par rapport à celui obtenu avec la méthode MinMax dans les deux cas où le nœud mobile est à l’intérieur des nœuds ancrés et dans le cas où le nœud mobile est à l’extérieur des nœuds ancrés. En effet la méthode MinMax modifié donne plus de précision par rapport à la méthode MinMax.

4.5.1 Réalisation des tests avec MinMax et MinMax modifié

Afin de pouvoir comparer les approches nous avons retenu la même topologie présentée pour tous les tests, avec un nombre précis de nœuds (3, 10, 20, 30 ancrés plus un mobile) et le temps de retransmission (2s, 2.5s, 3.5s, 4.5s respectivement) et en considérant les mêmes positions des nœuds avec le nœud mobile à l'intérieur des nœuds ancrés. Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux 4.5 et 4.6 :

Nombre de capteur	Le temps de génération (S)	Nombre de message reçus par phase	Taux de nombre de message reçus (%)	MEr (m)
1+3	2	0	1.67	—
		2	30.00	10.65
		3	68.33	4.95
1+5	2	2	1.67	8.98
		3	6.67	6.55
		4	33.33	4.94
		5	58.33	3.77
1+10	2.5	5	3.33	6.33
		6	8.33	5.57
		7	25.00	4.97
		8	21.67	4.39
		9	18.23	3.64
		10	15.00	2.82
1+20	3.5	9	2.50	4.52
		11	10.00	4.13
		12	25.00	3.69
		13	33.00	3.19
		14	17.50	2.66
		15	2.50	2.29
		17	5.00	1.77
		19	2.50	1.41
		20	1.25	1.2
1+30	4.5	11	1.25	12.33
		13	3.25	10.35
		16	8.33	8.58
		18	23.33	6.43

	20	15.00	5.17
	23	11.67	4.12
	25	18.75	3.54
	26	10.00	3.21
	27	2,50	2.61
	28	3.33	1.79
	30	1,25	1.05

TABLE 4.5: les résultats de simulation avec la méthode MinMax

Après l'amélioration de MinMax les résultats retournés par la simulation sont représentés dans le tableau 4.6 :

Nombre de capteur	Le temps de génération (S)	Nombre de message reçus par phase	Taux de nombre de message reçus (%)	MER (m)
1+3	2	0	5	—
		2	15.00	8.14
		3	80.00	3.25
1+5	2	2	3.33	6.01
		3	10.00	4.45
		4	28.33	3.27
		5	58.33	2.27
1+10	2.5	5	3.33	4.88
		6	10,00	4.17
		7	18.33	3.53
		8	26.67	2.98
		9	26.67	2.29
		10	15.00	1.54
1+20	3.5	9	2.50	3.71
		11	10.00	3.33
		12	13.33	2.82
		13	24.33	2.45
		14	15.00	1.94
		15	10.00	1.67
		17	18.75	1.23

		19	5.00	1.01
		20	1.25	0.82
1+30	4.5	11	8.33	10.46
		13	6.67	9.05
		16	13.33	7.30
		18	21.67	5.22
		20	18,33	4.09
		23	15.00	3.44
		25	18,33	2.89
		26	15.00	2.49
		27	21.67	1.95
		28	25.00	1.15
		30	3.33	0.51

TABLE 4.6: les résultats de simulation avec la méthode MinMax modifié

- **pour la topologie 3+1 ancre** : D'après la figure 4.5 nous remarquons que l'erreur obtenue par la méthode MinMax varie entre 10.65m et 4.95m tandis que celui obtenu avec MinMax modifié varie entre 8.14m et 3.25m, en effet cette dernière donne plus de précision dans le calcul de la position.

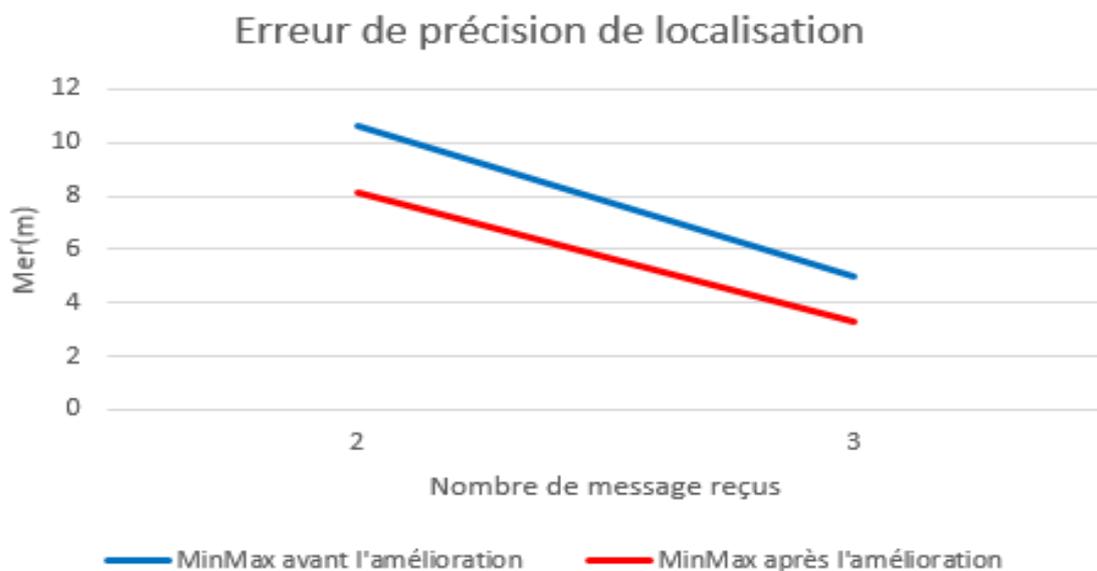


FIGURE 4.5 – Différence d'erreur de précision de localisation avant et après l'amélioration avec MinMax pour trois capteur.

- **pour la topologie 5+1 ancre** : (Figure 4.6) Dans les deux méthodes le nombre de messages reçus varie entre 2 et 5 messages par phase, nous remarquons que le taux d'erreur obtenu par la méthode MinMax varie entre 8.98m et 3.37m tandis que celui obtenu avec MinMax modifié varie entre 6.01m et 2.27m, en effet cette dernière donne plus de précision dans le calcul de la position.

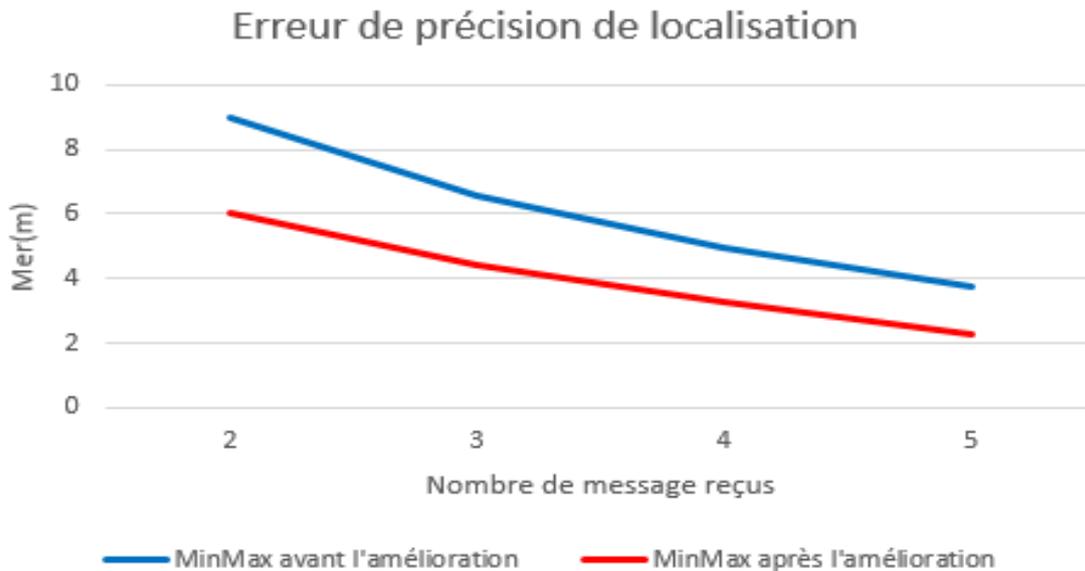


FIGURE 4.6 – Différence d'erreur de précision de localisation avant et après l'amélioration avec MinMax pour cinq capteur.

- **pour la topologie 10+1 ancre** : (Figure 4.7) Dans ce cas l'évolution d'erreur pour la méthode MinMax varie entre 6.33m et 2.82m tandis que celui obtenu avec MinMax modifié varie entre 4.88m et 1.64m, en effet cette dernière donne plus de précision dans le calcul de la position comme les deux topologie précédents.

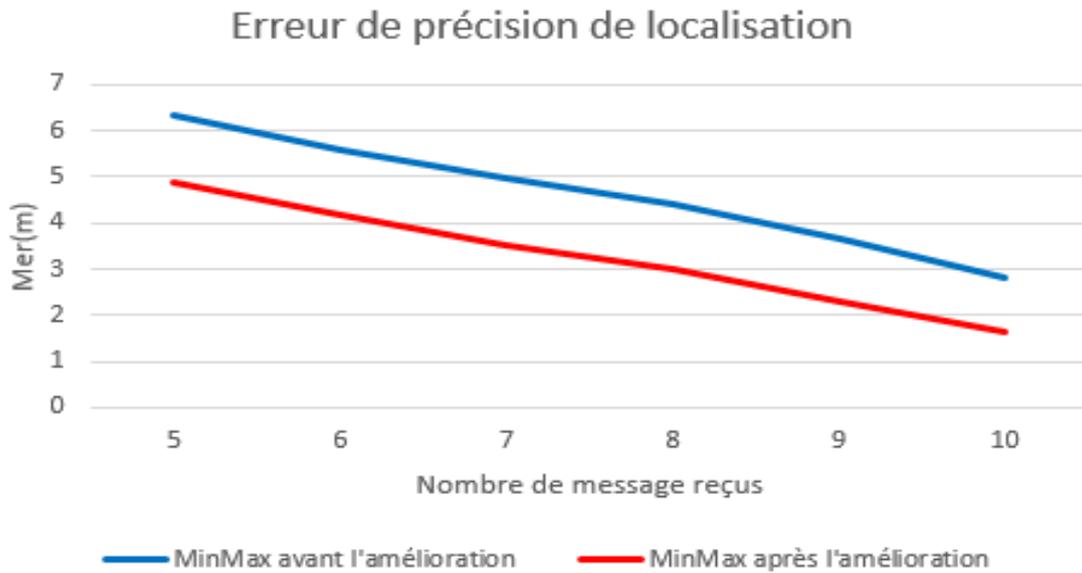


FIGURE 4.7 – Différence d'erreur de précision de localisation avant et après l'amélioration avec MinMax pour dix capteur.

- **pour la topologie 20+1 ancre** : (Figure 4.8) nous remarquons que l'erreur de précision obtenue par la méthode MinMax varie entre 4.52m et 1.2m tandis que celui obtenu avec MinMax modifié varie entre 3.74m et 0.92m, en effet cette dernière donne plus de précision dans le calcul de la position, mais à partir d'un nombre de message qui est égale à 17 les résultats des deux méthodes se rapprochent plus.

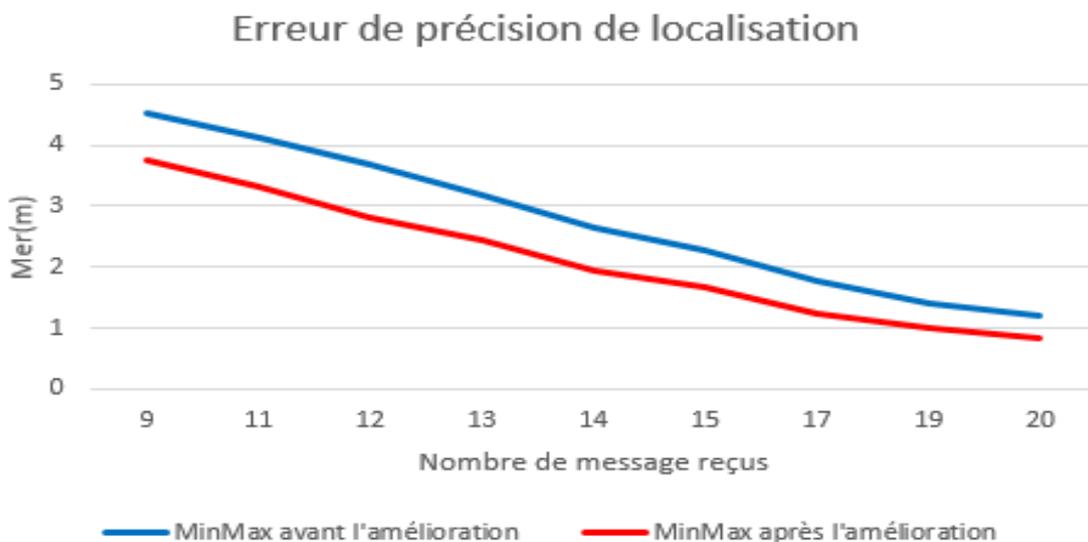


FIGURE 4.8 – Différence d'erreur de précision de localisation avant et après l'amélioration avec MinMax pour vingt capteur.

- **pour la topologie 30+1 ancre :** (Figure 4.9) dans ce cas l'évolution d'erreur de précision obtenu par la méthode MinMax varie entre 12.33m et 1.05m tandis que celui obtenu avec MinMax modifié varie entre 10.46m et 0.51m, en effet cette dernière donne plus de précision dans le calcul de la position, nous remarquons que dans le cas où $23 > \text{nombre de message reçu} > 30$: l'erreur des deux méthodes se rapprochent plus cependant la méthode MinMax modifié reste toujours plus précise que MinMax.

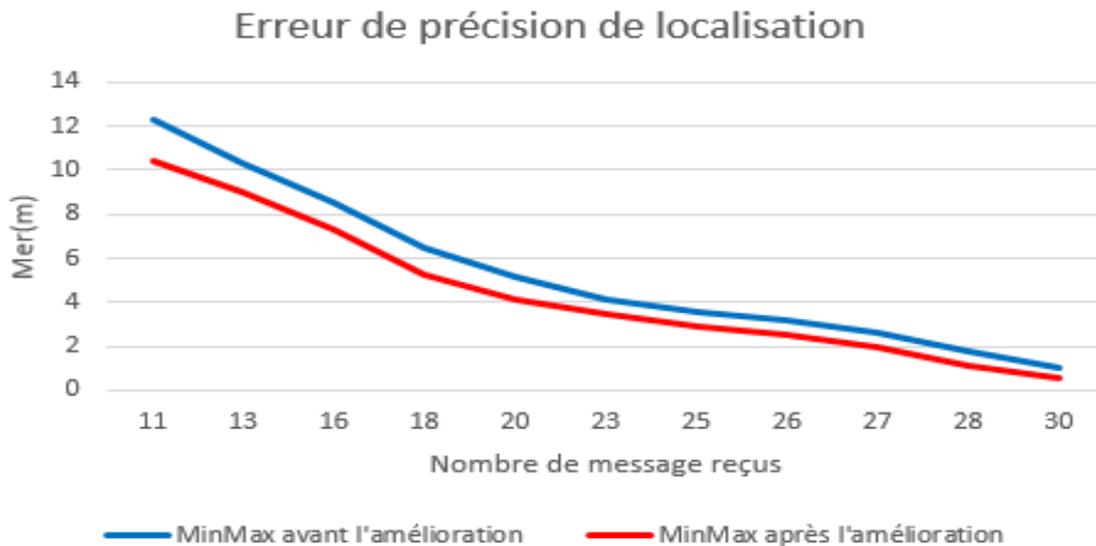


FIGURE 4.9 – Différence des taux d'erreur avant et après l'amélioration avec MinMax pour trente capteur.

D'après ces comparaisons on conclut que la méthode MinMax modifié nous donne plus de précision par rapport à MinMax. Avec l'augmentation de nombre d'ancres les deux méthodes se rapprochent et elles nous donnent une précision de localisation plus bonne mais la méthode MinMax modifié reste toujours meilleure que la méthode MinMax.

Comparaison de la consommation d'énergie entre MinMax et MinMax modifié :

Dans la figure 4.10 traitant la consommation d'énergie, on remarque que le changement du nombre d'ancre a un impact sur la consommation d'énergie, en effet les deux courbes confirment que plus le nombre d'ancre est élevé plus la consommation d'énergie augmente pour les deux méthodes.

Nous avons remarqué aussi à travers nos simulations que l'évolution de la consommation d'énergie lors de l'application des deux méthodes MinMax et MinMax modifié sont relativement équivalentes pour des différentes topologies, c'est ce que nous montre les graphiques de la figure 4.10

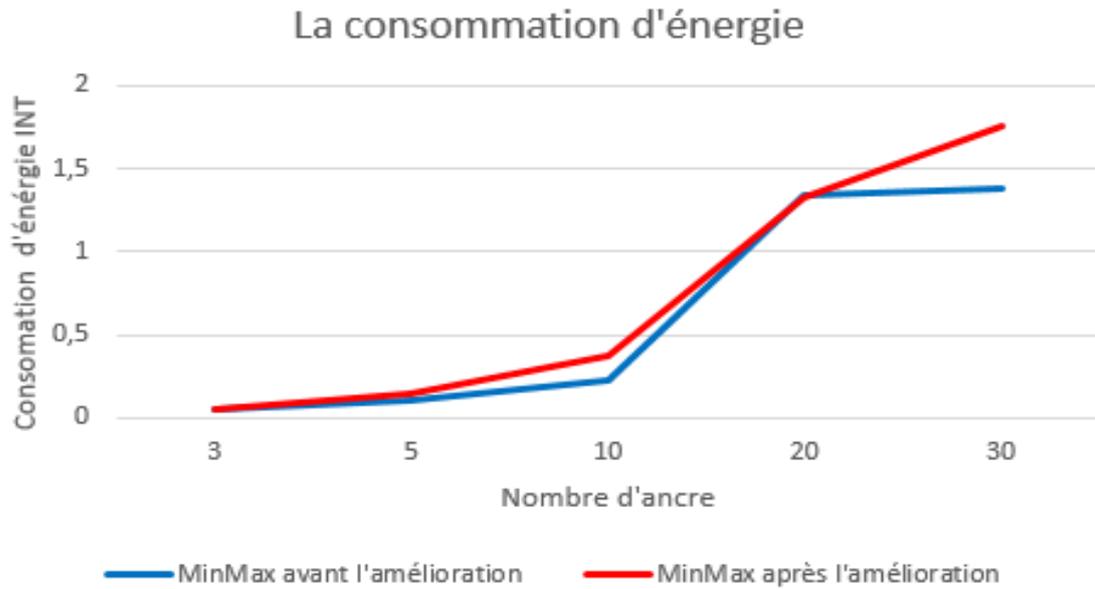


FIGURE 4.10 – Comparaison de la consommation d'énergie entre MinMax et MinMax améliorée.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons définis l'outil d'implémentation Contiki et son environnement de simulation, le simulateur Cooja avec lequel on a travaillé. Nous avons également défini les paramètres de simulation ainsi nous avons implémenter notre proposition et simuler pour une même topologie en fonction du nombre d'ancres. Après nous avons comparer les résultats de MinMax avec celle de MinMax modifié . Enfin nous déduisons que le fait de porter une améliorations à la méthode MinMax nous donne des résultats meilleurs pour la précision de localisation et une consommation dénergie légèrement plus importante.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les réseaux de capteurs sans fil ont connu un grand succès dès leur apparition dans tous les domaines (militaire, médicale, environnementale, etc.) grâce à leurs diverses fonctionnalités. Les réseaux de capteurs sans fil constituent des sujets de recherche innovants pour diverses disciplines des sciences et techniques de l'information et de la communication, mais avec toutefois des contraintes spécifiques s'élevant en défis. Parmi les problèmes posés dans ce type de réseaux, on trouve :

- La localisation, notamment comment trouver la position réelle.
- La contrainte énergétique, c'est à dire gérer la consommation d'énergie d'une manière raisonnable.

La connaissance de la position d'un capteur s'avère très nécessaire pour mieux exploiter les informations collectées et transmises par ce dernier. Cependant, la précision de cette position dépend de la méthode de localisation utilisée. En effet, de différentes méthodes ont été proposées pour améliorer la précision de la localisation. C'est dans le cadre de cette thématique que nous avons proposé une amélioration de la méthode de localisation MinMax.

Notre système de localisation est composé de trois éléments qui sont la technologie Zigbee de RSCF, la métrique puissance du signal reçus (RSSI) pour l'estimation de distance entre le nœud émetteur et le nœud récepteur, et la méthode de localisation MinMax.

Afin d'évaluer l'amélioration proposée en termes de précision de localisation et consommation d'énergie nous avons implémenté l'algorithme MinMax sous la plat-forme contikiOS dédié aux réseaux de capteurs sans fil.

Nous avons procédé par la suite à un ensemble de simulation sous cooja.

D'après la comparaison des résultats de MinMax et MinMax modifié nous avons déduit que notre proposition est meilleure pour la précision de localisation, mais sa consommation d'énergie est légèrement plus importante.

Ce travail nous a permis d'acquérir plusieurs connaissances de base sur le fonctionnement des réseaux de capteurs sans fil en générale, et de découvrir la programmation sur le système d'exploitation IOT(internet des objets) Contiki en particulier. Nous avons appris aussi à simuler les réseaux de capteurs sous le simulateur Cooja.

Comme perspective, il serait très intéressant d'implémenter un algorithme de localisation ayant comme avantage une meilleure précision avec une consommation d'ènergie réduite.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. Abdelfatah. "Développement d'une bibliothèque de capteurs. Master informatique professionnelle et recherche en informatique. CASAR". 24 avr 2008.
- [2] C. Castelluccia. "La Sécurité des Ccapteurs et Ré seaux de Capteurs". juin 2008.
- [3] W. Bonneau, M. Badet. " Mise en place d'une plateforme de test et d'expé rimentation, Master en Technologie de l'Internet". 2006.
- [4] D. Rey. "C'ollecte de données d'un réseau de capteurs sans fil en utilisant une surcouche réseau pair à pair". Université de Montréal". Avr 2010.
- [5] M. Thierry, B. Cécile. *Modélisation de la consommation d'énergie en vue de la conception conjointe (matériel/logiciel) des application embarquées. Application aux réseaux de capteurs sans fil(WSN), Thèse doctorat*". 2015.
- [6] <http://www.Tinyos.net/tinyos-1.x/doc/nesc/ref.pdf>, fév 2018.
- [7] S. Sentilles. "*Architecture logicielle pour Capteurs Sans-Fil en Réseau, Mémoire de Master*". juin 2006.
- [8] J. Stankovic, Q. Cao, T. Abdelzaher. "*The LiteOS Operating System : Towards Unix Like Abstraction for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 7th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*". 2008.
- [9] <http://www.Contiki.net/>, fév 2018.
- [10] P. Johnson. "*Remote continuous monitoring in the home*". 1996.
- [11] S. Kaissari. "Conception d'un Réseau de Capteurs Sans Fil. Master en génie électrique. Université de Mohammed. Rabat ". 06 juil 2015.
- [12] <https://word-view.officeapps.live.com/wv/WordViewer/reques>, dec 2017.
- [13] M. Kara. "Reseau de Capteurs Sans Fil : Etude en vue de la realisation d'un reseau de capteur GPS différentiel à faible coût. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand ". 2009.

- [14] I. Stojmenovic. "Handbook Of Sensor Networks : Algorithms And Architectures, Wiley-Intersciencene, ISBN : 978-0-471-68472-5". oct 2005.
- [15] C. Pu and H. Lee. "Indoor location tracking using received signal strength indicator. Université de Sunway College". 2011.
- [16] Y. P. Zhang. "Recent advances in integration of antennas on silicon chip and on ceramic package". 2005.
- [17] S. Farahani. "Zigbee wireless networks and transceivers. Elsevier Inc". sep 2008.
- [18] M. Aziz, B. Dlai and M. Ghais El Zein. "Application des algorithmes de haute resolution à la localisation de mobiles en milieu confiné. Rapport de thèse Doctoral de l'Université des sciences et technologies de Lille". juin 2010.
- [19] F. Brissaud, D. Charpentier, A. Barros, C. Bérenguer. "Capteurs Intelligents : Nouvelles technologies et Nouvelles problématiques pour la sureté De Fonctionnement. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques". 2008.
- [20] E. M Barbosa Nogueira. "Conception d'un système d'antennes pour la localisation en temps réel avec réseau de capteurs sans fil. Thèse de doctorat". juin 2013.
- [21] [Http : //Sed.Inrialpes.fr/stages/Stages2007/RapportEsteves](http://Sed.Inrialpes.fr/stages/Stages2007/RapportEsteves), avr 2018.
- [22] B. FALL. "Evaluation des performances d'un système de localisation de véhicules de transports guidés fondé sur l'association d'une technique radio ULB et d'une technique de retournement temporel,Thèse de doctorat,l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis". 14 sep 2013.
- [23] A. Chakraborty, N.B. Priyantha and H. Balakrishnan. "The Cricket location-support system. Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking, pages 32-34". 2000.
- [24] S. Belkheyr. "La Géo-localisation dans les Réseaux de Capteurs sans Fil, Ingénieur d'Etat en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen ". 2011.
- [25] M. Declerca, J.P. Curty. "Design and Optimization of Passive UHF RFID Systems, Springer". 2007.
- [26] J. Sallai, P. Volgyesi, M. Maroti, M. Kushwaha, K. Molnar and A. Ledeczi. "Sensor Node Localization Using Mobile Acoustic Beacons,PhD thesis, Vanderbilt University ". 2005.
- [27] N. Patwari, J.A. Costa and A.O. Hero III. "Distributed weighted multidimensional scaling for node localization in sensor networks, ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)". 2006.
- [28] N. Bulusu. "Self-Configuring Location Systems, PhD thesis, University of California". 2002.

- [29] S. Clément. "Quelques contributions dans les réseaux de capteurs sans fil : Localisation et Routage, École Doctorale 166, I2S Mathématiques et Informatique Laboratoire d'Informatique (EA 4128)". 10 juillet 2008.
- [30] V. H. Mathieu. "Réseaux de senseurs sans fil : problèmes de localisation". *Bruxelles*, 2007.
- [31] S. Hallab and A. Jraidi. "Développement d'un Système de surveillance de L'environnement à base d'un réseau de Capteurs sans fils". *L'institut supérieur de l'informatique Mahdia*, Jun 2013.
- [32] A. Yahyaoui and F. Ouazine. "Amélioration et simulation de la méthode de localisation Centroïde dans les WSNs. Mémoire de Master professionnel en Informatique. Université Abderahmane Mira de Bejaia.". 2017.

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil continuent de constituer sans doute un développement technologique majeur. Le problème de la localisation s'inscrit parmi les objectifs principaux des RCSFs.

De nombreuses méthodes de localisation ont vu le jour pour les RCSFs, parmi lesquelles on cite MinMax. Dans ce mémoire nous étudions et implémentons la méthode MinMax sous Contiki, et nous simulons sous Cooja, pour un système de localisation composé de ZigBee (IEEE 802.15.4) comme technologie de communication dans les RCSFs, de métrique RSSI pour l'estimation de distance entre le nœud émetteur et le nœud récepteur, et utilise MinMax comme méthode de localisation afin de calculer la position du nœud à partir des distances. Par la suite nous proposons une amélioration de la méthode MinMax qui est implémentée et ensuite validée par simulation.

Cette amélioration permet de réduire l'erreur de localisation mais consomme légèrement plus d'énergie par rapport à MinMax.

Mots-clés : Réseau de capteurs sans fil, localisation, MinMax, Centoïde, métrique RSSI, ZigBee, Contiki, Cooja,

Abstract

Wireless sensor networks continue to be a technological development major. The problem of location is one of the main objectives of WSNs.

Many localization methods have emerged for the WSNs, among which we quote MinMax. In this memoir we study and implement the MinMax method under Contiki, and we will simulate under Cooja, for a compound localization system of ZigBee (IEEE 802.15.4) as a communication technology in the RCSFs, of RSSI metric for distance estimation between the issuer node and the receiving node, and use MinMax as a location method to compute the position of the node from the distances. Subsequently we propose an improvement of the method that is implemented and then validated by simulation.

This improvement reduces the location error but consumes slightly more energy compared to MinMax.

Keywords : Wireless Sensor Network, Localization, MinMax, Centoid, Metric RSSI, ZigBee, Contiki, Cooja.