

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Télécommunication

**Spécialité** : Réseaux et télécommunication

**Par** :

MOSTEFAI CHAIMAE  
MOSTEGHANEMI REDA

**Sujet**

**LOCALISATION DES NŒUDS DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FILS**

Soutenu, le 07/ 07/ 2021, devant le jury composé de :

Mr. IRID S.M.H.	MCA	Univ. Tlemcen	Président
Mme. BENSLIMANE L.	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur
Mr. HADJILA M.	MCB	Univ. Tlemcen	Encadrant
Mme. SOUIKI S.	MCB	Univ. Ain Temouchent	Co-encadrant

Année universitaire 2020/2021

# Remerciements

Nous tenons à remercier Allah le tout puissant qui nous a donné durant toutes ces années d'études la santé, le courage, la confiance et la foi en nous-même ce qui nous a permis de progresser et d'arriver jusqu'à ce jour.

Nous ne saurions, réellement, trouver les expressions éloquentes que mérite notre encadrant Monsieur HADJILA Mourad maître de conférences à l'université Abou-Bekr Belkaid, pour sa grande patience, ses conseils et sa disponibilité.

Sa compétence a rendu ce travail particulièrement intéressant.

Nous le remercions également pour la confiance qu'il nous a accordée tout au long de cette année d'études.

Nous adressons nos remerciements aux membres du jury qui nous ferions l'honneur d'évaluer, d'examiner et d'enrichir cette modeste contribution.

Nous remercions cordialement, Monsieur IRID maître de conférences à l'université Abou-Bekr Belkaid d'avoir accepté de présider ce jury de mémoire.

Nous remercions également Madame BENSLIMANE Lamia maître assistante à l'université Abou-Bekr Belkaid d'avoir accepté de participer à ce mémoire en qualité d'examineur.

Nous profiterons aussi de ce mémoire pour exprimer nos plus vifs remerciements envers tous les professeurs de la faculté de technologie de Tlemcen qui nous a apporté du soutien durant nos études.

Que ce travail soit pour le gage de notre profonde estime à tous nos amis et tout celui qui nous ont aidés.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidés et donc ont contribué au succès de ce travail.

**Mostefai Chaimae & Mosteghanemi Reda**

# Dédicace

Je dédie ce projet :

**A ma chère mère Karima,**

Tout l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers un être très cher. Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour. Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin. Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez fait preuve, de l'encouragement et le soutien que vous ne cessez de manifester, j'espère que vous y trouverez les fruits de votre semence et le témoignage de ma grande fierté de vous avoir comme mère. J'implore Dieu, tout puissant, de vous accorder une bonne santé, une longue vie et beaucoup de bonheur.

**A mon cher père Okacha,**

Qui n'a jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.  
Que Allah, le tout puissant, vous protège et vous garde.

**A La mémoire de ma grand-mère paternel Rahma,**

J'aurais tant aimé que vous soyez présent.  
Qu'Allah ait vos âmes dans son vaste paradis.

**A mes chères frères Yassine, Youcef et sa femme Wafae,  
Tiyeb et sa femme Achwak,**

**A ma chère sœur Soumia, son mari Fodil et ma nièce Amani,**  
Pour leur soutien moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.  
Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Allah, le tout puissant, vous protège et vous garde.

**A mon cher binôme Reda,**

Pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet

**A mes chères ami(e)s Asma, Wassila, Hadjer, Meriem,  
Hanane, Fatima, Kawtar, Rahma et Nihel...**

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

**Et à tous les étudiants de ma promotion de Master**

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

**A toute ma famille.**

**Mostefai Chaimae**

# Dédicace

Je dédie ce travail à :

**Mes très chers parents Latifa et Djamel,**

Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien  
et leurs prières tout au long de mes études.

**Mes chers et adorable sœurs Fatima et Asmaà,  
et Mon gendre Nabil**

Qui ont su me comprendre, m'épauler et m'encourager  
dans les moments les plus difficiles.

Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès  
et que Allah, le tout puissant, vous protège et vous garde.

**A La mémoire de Mes grands-pères Mebarek et Omar,**

J'aurais tant aimé que vous soyez présents.  
Qu'Allah ait vos âmes dans son vaste paradis.

**La fierté de ma famille el-Hadja Khira,**

**Mes oncles Rachid & Mohammed,**

**et tous les membres de ma grande famille,** Mes chers grands-mères,  
oncles, tantes, leurs époux et épouses à mes chères cousins et cousines.

**Rafik, Younes M, Aissa, Soufiane, Amine, Younes S, Khaled, Adel,**

**Oussama, Abdelhamid, Mes cousins Imed & Mohammed,**

**Mes amis de toujours**

**et à tous les étudiants et mes frères de ma promotion de Master**

En souvenir de notre sincère et profonde amitié  
et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

**Et spécialement à Mon binôme Chaimae,**

Pour son accompagnement, son soutien  
et son amitié durant toutes ces années d'étude et tout au long de ce projet

**A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près.**

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond  
et mon affection la plus sincère.

**Mosteghanemi Reda**

# Resumé

La localisation est l'un des plus anciens problèmes mathématiques et techniques qui est à la pointe de la recherche et du développement depuis des décennies. Dans les RCSFs, l'estimation de l'emplacement des nœuds est devenue possible grâce aux derniers développements des communications sans fil et de technologie électronique. Les RCSFs ont un inconvénient qu'ils ne sont pas capables de reconnaître leur propre position. Pour résoudre ce problème, des études ont été faites sur des algorithmes servant à atteindre une estimation précise des nœuds dans les RCSFs. Dans ce mémoire, on met l'œil sur de nombreux algorithmes de localisation (range based et range free) et on va faire une étude sur des algorithmes basés sur RSS tels que GM-SDP-2 qui a été créé pour atteindre l'estimation ML (Maximum Likelihood) des positions des nœuds dans les RCSFs. Le but de cette étude est de simuler les résultats donnés par l'algorithme GM-SDP-2 sous MATLAB puis les comparer avec d'autres algorithmes (WLS et CRLB). Une amélioration basée sur le positionnement des ancres avec la méthode Fuzzy C-Means améliore de 21.08% l'algorithme GM-SDP-2 en termes de RMSE et offre une nette évaluation en termes de CDF.

**Mots-clés** : RCSF, algorithme de localisation, nœuds, RSS, GM-SDP-2, estimation ML, Fuzzy C-Means, RMSE, CDF.

# Abstract

Localisation is one of the oldest mathematical and technical problems that has been at the forefront of research and development for decades. In WSNs, the estimation of the location of nodes has become possible due to the latest developments in wireless communication and electronic technology. WSNs have a drawback that they are not able to recognize their own position. To solve this problem, studies have been done on algorithms to achieve accurate estimation of nodes in WSNs. In this document, we focus on several localization algorithms (range based and range free) and we will study RSS based algorithms such as GM-SDP-2 which was created to achieve Maximum Likelihood estimation of node positions in WSNs. The aim of this study is to simulate the results given by the GM-SDP-2 algorithm under MATLAB and then compare them with other algorithms (WLS and CRLB). An improvement based on the positioning of anchors with the Fuzzy C-Means method improves the GM-SDP-2 algorithm by 21.08% in terms of RMSE and offers a clear evaluation in terms of CDF.

***Keywords:*** WSN, location algorithm, nodes, RSS, GM-SDP-2, ML estimation, Fuzzy C-Means, RMSE, CDF.

# ملخص

يعتبر تحديد المواقع من أقدم المشكلات الرياضية والهندسية التي كانت في طليعة البحث والتطوير لعقود. أصبح تقدير شبكة الاستشعار اللاسلكية لموقع العقدة ممكناً بفضل أحدث التطورات في الاتصالات اللاسلكية والتكنولوجيا الإلكترونية، لشبكة الاستشعار اللاسلكية عيب يكمن في أنها غير قادرة على التعرف على موقعها. لحل هذه المشكلة، ركزت الدراسات على الخوارزميات المستخدمة للوصول إلى تقدير دقيق للعقد في شبكة الاستشعار اللاسلكية. في هذه المذكرة، نضع أعيننا على العديد من خوارزميات تحديد المواقع (range based و range free) وسنقوم بدراسة على الخوارزميات القائمة على قوة الإشارة المتلقاة مثل GM-SDP 2 الذي تم إنشاؤه لتحقيق تقدير ML لمواقع العقدة في شبكة الاستشعار اللاسلكية. الهدف من هذه الدراسات هو محاكاة النتائج التي قدمتها خوارزمية GM-SDP-2 على برنامج MATLAB ثم مقارنتها مع الخوارزميات الأخرى (WLS و CRLB)، يعمل التحسين المستند إلى تحديد موضع المراسي باستخدام طريقة Fuzzy C-Means على تحسين نتائج خوارزمية GM-SDP-2 بنسبة 21.08% من حيث RMSE ويقدم تقييماً واضحاً من حيث دالة التوزيع التراكمي.

**الكلمات الرئيسية:** شبكة الاستشعار اللاسلكية، خوارزمية تحديد المواقع، العقد، قوة الإشارة المتلقاة، GM-SDP-2، تقدير ML، FCM، RMSE، دالة التوزيع التراكمي.

# Table des matières

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre I

### Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

I.1	Introduction.....	2
I.2	Les capteurs .....	2
I.2.1	Définition .....	2
I.2.2	Architecture d'un capteur.....	3
I.2.2.1	Architecture matérielle .....	3
I.2.2.2	Architecture logicielle.....	4
I.2.3	Type des capteurs sans fil.....	4
I.2.3.1	Transmetteurs.....	5
I.2.3.2	Récepteurs.....	5
I.2.3.3	Régulateurs .....	5
I.2.3.4	Enregistreurs de données .....	6
I.2.3.5	Emetteurs-récepteurs.....	6
I.2.4	Caractéristiques d'un capteur.....	6
I.2.4.1	Fonction de transfert.....	6
I.2.4.2	Sensibilité.....	7
I.2.4.3	Plage de mesure ou plage dynamique.....	7
I.2.4.4	Précision ou incertitude.....	7
I.2.4.5	Hystérésis .....	7
I.2.4.6	Non-linéarité (souvent appelée linéarité).....	7
I.2.4.7	Bruit.....	8
I.2.4.8	Résolution.....	8
I.2.4.9	Bande passante .....	9



I.3 Réseaux de capteurs sans fil .....	9
I.3.1 Description des réseaux de capteurs sans fil.....	9
I.3.2 Architecture de communication dans les RCSF.....	10
I.3.3 Spécificités des RCSFs [10].....	11
I.3.3.1 Durée de vie .....	11
I.3.3.2 Topologie dynamique .....	11
I.3.3.3 Routage des données dans un RCSF.....	11
I.3.3.4 Tolérance aux fautes, adaptabilité et fiabilité dans un RCSF .....	12
I.3.3.5 Passage à l'échelle dans un RCSF.....	12
I.3.3.6 Puissance de calcul dans un RCSF.....	12
I.3.3.7 Bande passante limitée .....	13
I.3.3.8 Sécurité .....	13
I.3.3.9 Qualité de Service.....	13
I.3.3.10 Energie d'un RCSF.....	14
I.3.4 Applications des RCSFs .....	14
I.3.4.1 Applications militaires.....	15
I.3.4.2 Applications environnementales et agricoles .....	15
I.3.4.3 Applications médicales.....	16
I.3.4.4 Applications de surveillance.....	16
I.3.4.5 Applications industrielles .....	17
I.3.4.6 Applications commerciales .....	17
I.3.4.7 Applications domestiques.....	17

## Chapitre II

### Les algorithmes de localisation dans les réseaux de capteurs sans fil

II.1 Introduction à la localisation dans Les RCSFs.....	19
II.2 Concepts généraux sur le "range-based" et le "range-free" .....	20
II.3 Algorithmes basés sur les distances "Range-based" .....	20
II.3.1 Intensité du signal reçu (RSS).....	21
II.3.1.1 Techniques de positionnement basées sur le profilage RSS .....	22
II.3.2 Temps d'arrivée (ToA) .....	24

II.3.2.1	Estimation unidirectionnelle.....	25
II.3.2.2	Estimation bidirectionnelle.....	25
II.3.3	Différence de temps d'arrivée (TDoA).....	25
II.3.3.1	Techniques de positionnement basées sur la TDoA .....	26
II.3.4	Angle d'arrivée (AoA) .....	28
II.3.4.1	Techniques de positionnement basées sur l'AoA [32].....	29
II.3.5	Mesure du voisinage.....	31
II.3.6	Techniques de positionnement par multilatération .....	31
II.3.6.1	Trilatération .....	31
II.3.6.2	Multilatération.....	33
II.4	Algorithmes à portée libre "Range-free" .....	35
II.4.1	Méthode de localisation DV-Hop .....	35
II.4.2	L'algorithme APIT.....	37
II.4.2.1	L'intersection des triangles .....	38
II.4.2.2	Le test PIT .....	38
II.4.3	L'algorithme SeRLoc.....	38
II.4.4	L'algorithme MDS .....	39
II.5	Étude comparative des approches de mesure physique.....	40

# Chapitre III

## Localisation basée sur RSS dans les RCSFs à l'aide de l'algorithme GM-SDP-2

III.1	Introduction.....	42
III.2	Matériels.....	42
III.2.1	Logiciel Matlab .....	42
III.2.2	CVX.....	42
III.3	Algorithmes étudiés.....	43
III.3.1	Calcul de la puissance reçue .....	43
III.3.2	Algorithme GM-SDP-2.....	43
III.3.2.1	Estimation de la position.....	43
III.3.2.2	Technique de positionnement par GM-SDP-2 .....	44

III.3.3	Cramer-rao lower bound.....	45
III.3.4	Algorithme WLS.....	45
III.3.4.1	Technique de positionnement par WLS.....	45
III.4	ANALYSE DES RESULTATS.....	47
III.4.1	Influence d'un nombre d'ancres .....	47
III.4.2	Evaluation basée sur CDF.....	48
III.5	Algorithme proposé .....	49
III.5.1	Fuzzy C-Means (FCM) .....	49
III.5.2	Résultats de simulation.....	50
III.5.3	Evaluation basée sur CDF .....	53
	Conclusion générale.....	55

# Liste des figures

<i>Figure I.1: Acquisition de données et actionnement [2]</i> .....	2
<i>Figure I.2 : Capteurs sans fil [3]</i> .....	3
<i>Figure I.3: Architecture matérielle d'un capteur [4]</i> .....	3
<i>Figure I.4: Transmetteur</i> .....	5
<i>Figure I.5: Récepteur</i> .....	5
<i>Figure I.6: Régulateurs</i> .....	5
<i>Figure I.7: Enregistreurs de données</i> .....	6
<i>Figure I.8: Emetteurs-récepteurs</i> .....	6
<i>Figure I.9: Architecture d'un réseau de capteurs</i> .....	10
<i>Figure I.10: Clustérisation d'un RCSF [11]</i> .....	12
<i>Figure I.11: Domaines d'applications</i> .....	14
<i>Figure II.1: Les protocoles de localisation</i> .....	19
<i>Figure II.2: Déploiement du LANDMARC [33]</i> .....	24
<i>Figure II.3: ToA unidirectionnel [31]</i> .....	25
<i>Figure II.4: ToA bidirectionnel [31]</i> .....	25
<i>Figure II.5: TDOA [31]</i> .....	26
<i>Figure II.6: Calcul de la localisation par TDoA [33]</i> .....	26
<i>Figure II.7: Un réseau de microphones en forme de Y a quatre éléments [41]</i> .....	28
<i>Figure II.8: Mesure d'angle [33]</i> .....	29
<i>Figure II.9: Calcul de la localisation par la mesure de l'AoA [33]</i> .....	29
<i>Figure II.10: Proximité des k-voisins [33]</i> .....	31
<i>Figure II.11: Technique de trilatération [47]</i> .....	32
<i>Figure II.12: Exemple de méthode de trilatération [31]</i> .....	32
<i>Figure II.13: Technique de multilatération [47]</i> .....	34
<i>Figure II.14: Une instance de l'algorithme DV-Hop[54]</i> .....	36
<i>Figure II.15: Mesures de surface [33]</i> .....	37
<i>Figure II.16: Estimation de SeRLoc [32]</i> .....	39
<i>Figure III.1: Positionnement des capteurs sous MATLAB dans le cas de 4 ancres...</i>	47
<i>Figure III.2: RMSE par rapport au nombre d'ancres</i> .....	48
<i>Figure III.3: CDF des erreurs de localisation pour les deux algorithmes</i> .....	49
<i>Figure III.4: Positionnement des capteurs avec et sans clustering dans les cas de 4 et 8 ancres</i> .....	51
<i>Figure III.5 : Comparaison de RMSE par rapport au nombre d'ancres avant et après le clustering</i> .....	52
<i>Figure III.6 : Comparaison des CDF des erreurs de localisation pour les deux algorithmes avec et sans clustering</i> .....	53

# Liste des Tables

<i>Tableau II.1: Étude comparative des mesures physiques [33].....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau III.1: Comparaison entres les résultats des RMSE après le clustering des ancrees et les résultats de positionnement fixe en fonction de nombre d'ancrees.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau III.2: CDF en fonction de la portée pour GM-SDP-2.....</i>	<i>54</i>

# Liste des Abréviations

<b><i>AoA</i></b>	Angle of Arrival
<b><i>APIT</i></b>	Approximate Point in Triangle
<b><i>APS</i></b>	Ad hoc Positioning System
<b><i>CAN</i></b>	Convertisseur Analogique-Numérique
<b><i>CDF</i></b>	Cumulative Distribution Function
<b><i>CNRS</i></b>	Centre National de la Recherche Scientifique
<b><i>CPU</i></b>	Central Processing Unit
<b><i>DARPA</i></b>	Defense Advanced Research Projects Agency
<b><i>DSN</i></b>	Distributed Sensor Network
<b><i>DV-HOP</i></b>	Distance Vector-Hop
<b><i>EDM</i></b>	Euclidean Distance Matrix
<b><i>FSO</i></b>	Full Scale Output
<b><i>FCM</i></b>	Fuzzy C-Means
<b><i>GM-SDP</i></b>	Gaussian mixture-semidefinite programming
<b><i>GPS</i></b>	Global Positioning System
<b><i>Heudiasyc</i></b>	Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes
<b><i>JBREWS</i></b>	Joint Biological Remote Early Warning System
<b><i>LAEP</i></b>	Localized Encryption and Authentication Protocol
<b><i>MDS</i></b>	Multi-Dimensional Scaling
<b><i>ML</i></b>	Maximum Likelihood
<b><i>PIT</i></b>	Point in Triangle
<b><i>QoS</i></b>	Quality of Service
<b><i>RADAR</i></b>	Radio Detection and Ranging
<b><i>RAM</i></b>	Random Access Memory
<b><i>RCSF</i></b>	Réseaux de Capteurs Sans Fil
<b><i>RF</i></b>	Radio-Fréquence
<b><i>RFID</i></b>	Radio Frequency identification
<b><i>RMSE</i></b>	Root Mean Square Error
<b><i>SE</i></b>	Système d'Exploitation
<b><i>SeRLoc</i></b>	Secure Range-Independent Location
<b><i>TDoA</i></b>	Time Difference of Arrival
<b><i>ToA</i></b>	Time of Arrival
<b><i>WATS</i></b>	Wide Area Tracking System
<b><i>WLS</i></b>	Weighed-Least Squares

# Introduction générale

Aujourd'hui, la vision des réseaux de capteurs sans fil est devenue une réalité grâce aux derniers développements en matière de communication sans fil et de technologie électronique, qui permettent de développer des capteurs de communication multifonctionnels, peu coûteux, à faible consommation, de petite taille et à courte portée. Ces capteurs intelligents à faible coût avec des réseaux sans fil et un déploiement de masse offrent des possibilités sans précédent de surveillance et de contrôle des maisons, des villes et de l'environnement. Les capteurs en réseau ont un large éventail d'applications militaires, médical, commercial etc., générant de nouvelles capacités de reconnaissance et de surveillance, ainsi que d'autres applications tactiques.

La capacité d'estimation de l'emplacement est essentielle dans la plupart des applications de réseau de capteurs sans fil. La technologie de positionnement de réseau de capteurs sans fil est utilisée pour estimer l'emplacement des capteurs avec des emplacements inconnus dans le réseau, en utilisant une certaine connaissance préalable des emplacements de capteurs spécifiques dans la mesure entre le réseau et les capteurs, tels que la distance, la différence de temps d'arrivée, l'angle d'arrivée, et la connectivité.

Notre travail a pour objectif de proposer une amélioration de l'algorithme de localisation GM-SDP-2 afin de localiser les nœuds dans un RCSF.

Pour se faire, nous avons organisé ce mémoire dans un document comportant trois chapitres. Le premier chapitre présente les principales caractéristiques d'un nœud du RCSF, ses types et son architecture, ce chapitre couvre aussi les caractéristiques des RCSFs ainsi que ses domaines d'application.

Le deuxième chapitre présente un aperçu sur les algorithmes utilisés pour estimer la localisation des nœuds dans un RCSF, des algorithmes basés sur la distance physique « range-based » qui sont plus précis et des algorithmes basés sur les informations de connectivité entre les nœuds « range-free » qui sont plus économiques.

La partie de la simulation des algorithmes fera l'objet du troisième chapitre.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale suivie par quelques directions de recherche possibles visant des perspectives à être étudiées.

# Chapitre I

Généralités sur les réseaux  
de capteurs sans fil



## I.1 Introduction

De nos jours, le RCSF est un domaine d'intérêt pour la communauté de recherche. Les RCSFs ont une capacité de collection des données physiques à partir d'environnements spécifiques (température, lumière, etc...) entre autres. Les RCSFs jouent un très grand rôle dans nombreux processus (surveillance, d'automatisation des villes) et utilisés dans plusieurs domaines d'application. Par contre ces RCSFs ont un inconvénient qu'ils ne sont pas capables de reconnaître leur propre position.

Dans ce chapitre on va sur les généralités et les caractéristiques des capteurs et leurs réseaux sans fils.

## I.2 Les capteurs

### I.2.1 Définition

Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée (information d'entrée) en une autre grandeur physique de nature électrique qui est convertit en une valeur mesurée dans une représentation analogique ou numérique (utilisable), telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité, une accélération, l'humidité, etc. La différence entre un capteur et un instrument de mesure est qu'il ne s'agit que d'une simple interface entre des processus physiques et des informations manipulables. Par opposition, l'instrument de mesure est un appareil autonome se suffisant à lui-même, disposant d'un affichage ou d'un système de stockage des données. Nous pouvons dire que les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données et que leur mise en œuvre est du domaine de l'instrumentation [1].

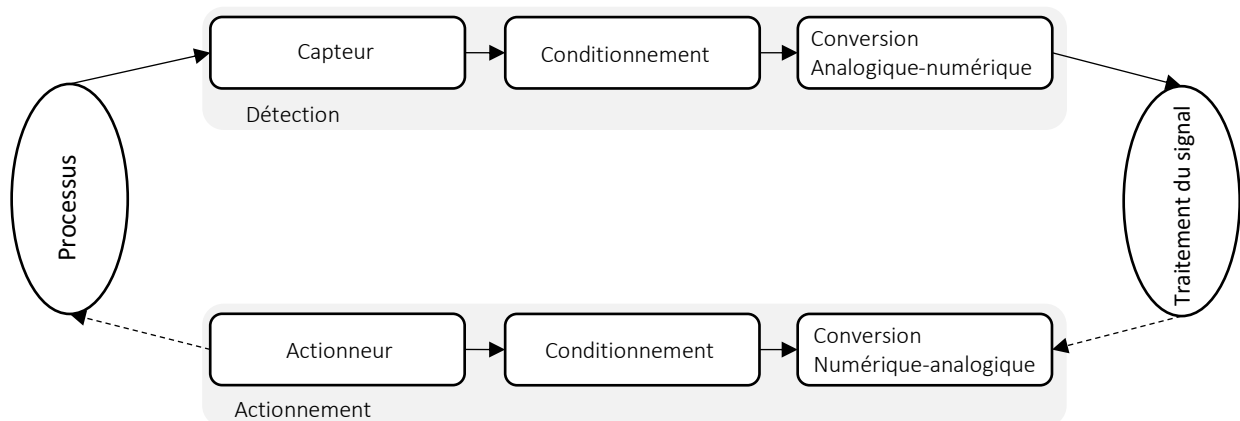


Figure I.1 : Acquisition de données et actionnement [2]

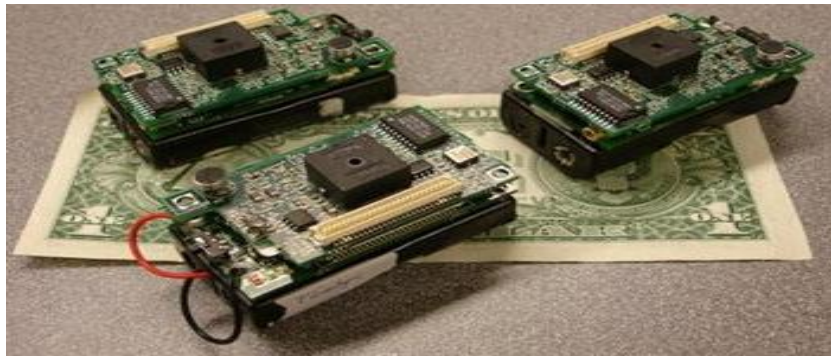


Figure I.2 : Capteurs sans fil [3]

## I.2.2 Architecture d'un capteur

Un « *nœud capteur* » contient quatre unités de base : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de contrôle d'énergie. Selon le domaine d'application, il peut aussi contenir des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS), ou bien un système générateur d'énergie (cellule solaire). Quelques micro-capteurs, plus volumineux, sont dotés d'un système mobilisateur chargé de les déplacer en cas de nécessité. La figure 1.3 représente l'Architecture matérielle d'un capteur :

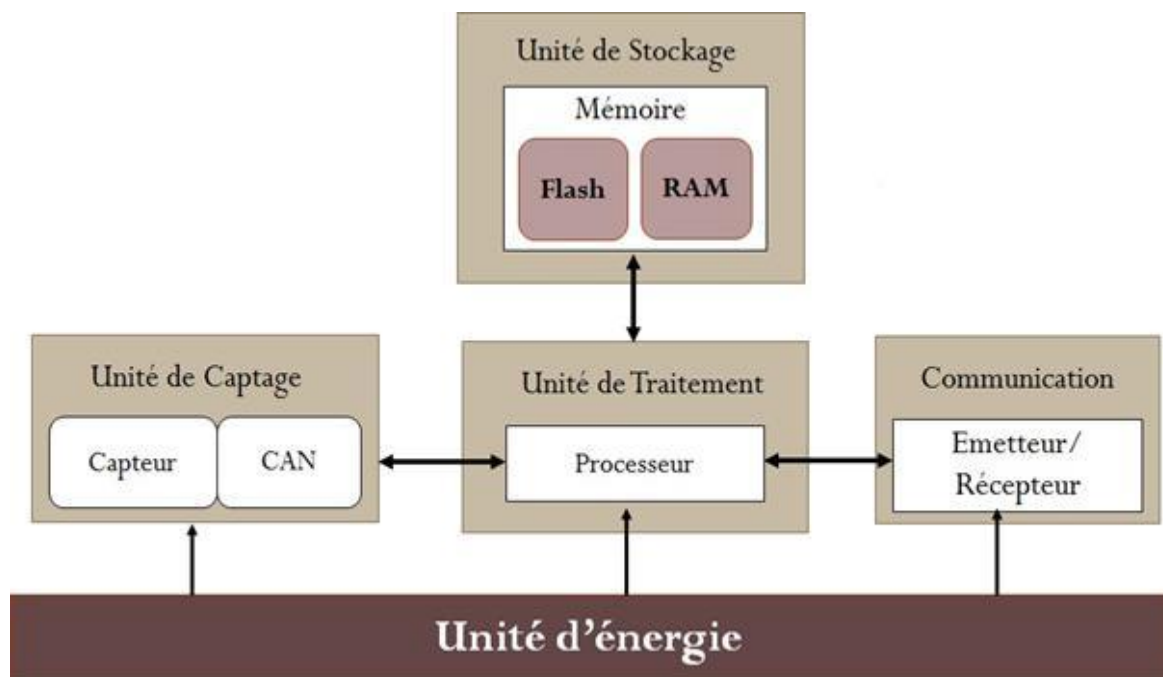


Figure I.3: Architecture matérielle d'un capteur [4]

### I.2.2.1 Architecture matérielle

L'architecture matérielle d'un capteur est composée de quatre unités :

**a) Unité de capture :** Cette unité se compose d'un capteur qui obtiendra les valeurs de mesure numériques des paramètres environnementaux à partir d'un CAN, et permettra aux informations enregistrées d'être converties et transmises à l'unité de traitement.

**b) Unité de traitement :** Il s'agit de l'unité principale du capteur. Elle se compose de deux interfaces, à savoir l'interface de l'unité de capture et l'interface de l'unité de communication. Elle se compose également d'un processeur et d'un SE spécifique. Elle récupère les informations de l'unité d'acquisition et les transmet à l'unité de communication radio.

**c) Unité de transmission des données :** Cette unité est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication radio.

**d) Bloc d'alimentation :** Il s'agit de la partie de base de l'architecture du capteur qui est utilisé pour alimenter tous ses composants. L'unité peut également gérer le système de charge d'énergie à partir de l'environnement observé (comme les cellules solaires) pour prolonger la durée de vie globale du réseau.

### I.2.2.2 Architecture logicielle

La partie logicielle englobe principalement le SE du capteur. TinyOS est un système d'exploitation léger, open source pour les réseaux de capteurs, il est le plus répandu des SE dans le domaine des RCSFs. Il est libre et utilisé dans les plus grands projets de recherche sur le sujet pour le développement et le test des algorithmes et protocoles réseau [4].

### I.2.3 Type des capteurs sans fil

Il existe plusieurs types de capteurs sans fil, entre autres, on peut citer quelques exemples selon [5] :

### I.2.3.1 Transmetteurs

Les transmetteurs utilisent des capteurs spécifiques pour mesurer une propriété dans un procédé, puis transmettent les données à un récepteur via des signaux radio. La figure 1.4 présente un transmetteur.



Figure 1.4: Transmetteur

### I.2.3.2 Récepteurs

Les récepteurs reçoivent et interprètent les données sans fil. Le récepteur lit le signal radio et le convertit dans le résultat souhaité, certains récepteurs peuvent même exporter les données vers un logiciel avancé. La figure 1.5 présente un récepteur.



Figure 1.5: Récepteur

### I.2.3.3 Régulateurs

Les régulateurs fonctionnent de manière analogue à un récepteur, dans le sens où ils reçoivent et analysent les données provenant de transmetteurs sans fil. Toutefois, les régulateurs sans fil sont également capables de manipuler un procédé selon les données mesurées. La figure 1.6 présente un régulateur.



Figure 1.6: Régulateurs

### I.2.3.4 Enregistreurs de données

Les enregistreurs de données constituent un type particulier de réseau de mesure sans fil, car ils offrent à l'utilisateur final une nouvelle dimension de flexibilité. Ils peuvent surveiller à distance la température n'importe où, puis transmettre les données à un ingénieur une fois que le lecteur est ramené au récepteur. La figure 1.7 présente un enregistreur de données.



Figure 1.7: Enregistreurs de données

### I.2.3.5 Émetteurs-récepteurs

Les émetteurs-récepteurs contiennent un émetteur et un récepteur dans une seule et même unité. Grâce à leur capacité à retransmettre des signaux, ils sont capables d'étendre la portée des réseaux de mesure sans fil. La figure 1.8 présente un émetteur-récepteur.



Figure 1.8: Émetteur-récepteur

## I.2.4 Caractéristiques d'un capteur

Voici quelques-unes des caractéristiques [6] les plus importantes des capteurs :

### I.2.4.1 Fonction de transfert

La fonction de transfert montre la relation fonctionnelle entre le signal d'entrée physique et le signal de sortie électrique. Habituellement, cette relation est représentée par un graphique montrant la relation entre le signal d'entrée et le signal de sortie, et les détails de cette relation peuvent constituer une description complète des caractéristiques du capteur. Pour les capteurs coûteux qui sont étalonnés individuellement, cela peut prendre la forme d'une courbe d'étalonnage certifiée.

### I.2.4.2 Sensibilité

La sensibilité est définie en termes de relation entre le signal physique d'entrée et le signal électrique de sortie. Il s'agit généralement du rapport entre une petite variation du signal électrique et une petite variation du signal physique. En tant que telle, elle peut être exprimée comme la dérivée de la fonction de transfert par rapport au signal physique. Les unités typiques sont les volts/kelvin, les millivolts/kilopascal, etc. Un thermomètre aurait une "haute sensibilité" si une petite variation de température entraînait une grande variation de tension.

### I.2.4.3 Plage de mesure ou plage dynamique

La plage des signaux physiques d'entrée qui peuvent être convertis en signaux électriques par le capteur est la plage dynamique ou étendue. Les signaux situés en dehors de cette plage sont censés provoquer une imprécision inacceptable. Cette plage ou gamme dynamique est généralement spécifiée par le fournisseur du capteur comme la plage sur laquelle les autres caractéristiques de performance décrites dans les fiches techniques sont censées s'appliquer. Les unités typiques sont le kelvin, le pascal, le newton, etc.

### I.2.4.4 Précision ou incertitude

L'incertitude est généralement définie comme la plus grande erreur attendue entre les signaux de sortie réels et idéaux. Les unités typiques sont les kelvins. Elle est parfois indiquée comme une fraction de la sortie pleine échelle ou une fraction de la lecture. Par exemple, un thermomètre peut être garanti précis à 5 % près de FSO. La "précision" est généralement considérée par les métrologues comme un terme qualitatif, tandis que l'"incertitude" est quantitative. Par exemple, un capteur peut avoir une meilleure précision qu'un autre si son incertitude est de 1%, alors que l'autre a une incertitude de 3%.

### I.2.4.5 Hystérésis

Certains capteurs ne reviennent pas à la même valeur de sortie lorsque le stimulus d'entrée est augmenté ou diminué. La largeur de l'erreur attendue en fonction de la quantité mesurée est définie comme l'hystérésis. Les unités typiques sont le kelvin ou le pourcentage de FSO.

### I.2.4.6 Non-linéarité (souvent appelée linéarité)

L'écart maximal par rapport à une fonction de transfert linéaire sur la plage dynamique spécifiée. Il existe plusieurs mesures de cette erreur. La plus courante compare la fonction de transfert réelle à la "meilleure ligne droite", qui se situe à mi-chemin entre les deux lignes

parallèles qui englobent l'ensemble de la fonction de transfert sur la plage dynamique spécifiée de l'appareil. Ce choix de méthode de comparaison est populaire parce qu'il donne l'impression que la plupart des capteurs sont les meilleurs. D'autres lignes de référence peuvent être utilisées, l'utilisateur doit donc veiller à comparer en utilisant la même référence.

#### I.2.4.7 Bruit

En plus du signal de sortie, tous les capteurs génèrent également du bruit de sortie. Dans certains cas, le bruit du capteur est inférieur au bruit de l'élément suivant de l'électronique, ou inférieur aux fluctuations du signal physique, auquel cas il n'est pas important. Dans de nombreux autres cas, le bruit du capteur limite les performances du système basé sur le capteur. Le bruit est généralement réparti sur le spectre des fréquences. De nombreuses sources de bruit courantes produisent une distribution de bruit blanc, c'est-à-dire que la densité spectrale du bruit est la même à toutes les fréquences. Le bruit de Johnson dans une résistance est un bon exemple d'une telle distribution du bruit. Pour le bruit blanc, la densité spectrale du bruit est caractérisée en unités de volts/racine (Hz). Une distribution de cette nature ajoute du bruit à une mesure avec une amplitude proportionnelle à la racine carrée de la bande passante de la mesure. Comme il existe une relation inverse entre la largeur de bande et le temps de mesure, on peut dire que le bruit diminue avec la racine carrée du temps de mesure.

#### I.2.4.8 Résolution

La résolution d'un capteur est définie comme la fluctuation minimale détectable du signal. Les fluctuations étant des phénomènes temporels, il existe une certaine relation entre l'échelle de temps de la fluctuation et l'amplitude minimale détectable. Par conséquent, la définition de la résolution doit inclure certaines informations sur la nature de la mesure effectuée. De nombreux capteurs sont limités par un bruit dont la distribution spectrale est blanche. Dans ces cas, la résolution peut être spécifiée en unités de signal physique/racine (Hz). Ensuite, la résolution réelle pour une mesure particulière peut être obtenue en multipliant cette quantité par la racine carrée de la largeur de bande de mesure. Les fiches techniques des capteurs indiquent généralement la résolution en unités de signal/racine (Hz) ou donnent un signal détectable minimum pour une mesure spécifique. Si la forme de la distribution du bruit est également spécifiée, il est possible de généraliser ces résultats à toute mesure.

### I.2.4.9 Bande passante

Tous les capteurs ont des temps de réponse finis à un changement instantané du signal physique. De plus, de nombreux capteurs ont un temps de décroissance, qui représente le temps nécessaire pour que la sortie du capteur revienne à sa valeur d'origine après une variation du signal physique. Les réciproques de ces temps correspondent respectivement aux fréquences de coupure supérieure et inférieure. La bande passante d'un capteur est la plage de fréquences comprise entre ces deux fréquences.

## I.3 Réseaux de capteurs sans fil

### I.3.1 Description des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil sont considérés comme un type spécial des réseaux ad hoc où l'infrastructure fixe de communication et l'administration centralisée sont absentes et les nœuds jouent, à la fois, le rôle des hôtes et des routeurs. Les nœuds capteurs sont des capteurs intelligents "smart sensors", capables d'accomplir trois tâches complémentaires : le relevé d'une grandeur physique, le traitement éventuel de cette information et la communication avec d'autres capteurs. L'ensemble de ces capteurs, déployés pour une application, forme un réseau de capteurs. Le but de celui-ci est de surveiller une zone géographique, et parfois d'agir sur celle-ci (il s'agit alors de réseaux de capteurs actionneurs). On peut citer comme exemples un réseau détecteur de feu de forêt, ou un réseau de surveillance de solidité d'un pont après un tremblement de terre. Le réseau peut comporter un grand nombre de nœuds (des milliers). Les capteurs sont placés de manière plus ou moins aléatoire (par exemple par largage depuis un hélicoptère) dans des environnements pouvant être dangereux. Toute intervention humaine après le déploiement des nœuds capteurs est la plupart du temps exclue, le réseau doit donc s'autogérer. Afin que les nœuds capteurs travaillent d'une façon coopérative, les informations recueillies sont partagées entre eux par voie hertzienne. Le choix du lien radio plutôt que du lien filaire permet un déploiement facile et rapide dans un environnement pouvant être inaccessible pour l'être humain [7, 8].



### I.3.2 Architecture de communication dans les RCSF

L'architecture du réseau de capteurs est montrée dans la figure 1.9. L'utilisateur accède à distance aux données capturées à travers un nœud appelé le nœud directeur de tâche "Task Manager Node". Le nœud directeur de tâche est relié à l'Internet ou au satellite à travers un nœud destinataire "puits" (sink en anglais). Ce dernier agit en tant que passerelle pour le réseau de capteurs, c'est-à-dire qu'il relie des réseaux de capteurs à d'autres réseaux. Ce nœud est responsable, en plus de la collecte des rapports, de la diffusion des demandes sur les types de données requises aux capteurs via des messages de requêtes. Il a également d'autres capacités de traitement de l'information pour une transformation ultérieure s'il y a lieu. Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de capture appelée champ de captage. Les nœuds capteurs rassemblent les données et les conduisent au destinataire. De cette manière, les utilisateurs peuvent rechercher l'information dans les nœuds destinataires pour surveiller et commander l'environnement à distance. Notons qu'un réseau de capteurs peut contenir plusieurs nœuds puits diffusant des intérêts (ce sont la description des données requises par le nœud destinataire en utilisant une appellation combinée attribut-valeur) différents. Par exemple, un nœud puits peut demander à tous les capteurs se trouvant dans la région nord du champ de captage d'envoyer un rapport de température chaque 1 minute, pendant qu'un autre peut être intéressé seulement par les hautes températures ( $> 40^{\circ}\text{C}$ ) dans la région sud. Par conséquent, un capteur doit pouvoir stocker toutes les requêtes reçues, et les traiter séparément [9].

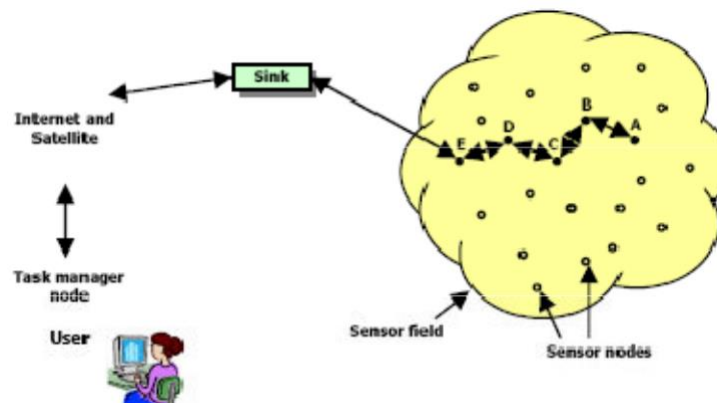


Figure 1.9: Architecture d'un réseau de capteurs

### I.3.3 Spécificités des RCSFs [10]

#### I.3.3.1 Durée de vie

C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures à plusieurs années selon l'emplacement de la zone d'intérêt.

#### I.3.3.2 Topologie dynamique

Le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phrases : déploiement, post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner, ...), redéploiement de nœuds additionnels.

#### I.3.3.3 Routage des données dans un RCSF

Pour limiter le nombre de communications coûteuses en énergie, les réseaux de capteurs sans fil requièrent des protocoles de routage efficaces. Une des solutions employées par les protocoles de routage est la Clustérisation, qui divise le réseau en plusieurs clusters. Dans chacun de ces clusters, un nœud maître (clusterhead) est élu et aura pour mission de récupérer les informations des nœuds du cluster dont il a la charge pour les transmettre aux autres clusters et inversement. Le choix du nœud maître dans un protocole de routage va être fait en désignant par exemple le nœud avec l'énergie la plus importante, pour augmenter la durée de vie du réseau.

La figure 1.10 représente un exemple de réseau clustérisé où les nœuds A, B et C ont été respectivement élus clusterhead des clusters 1, 2 et 3.

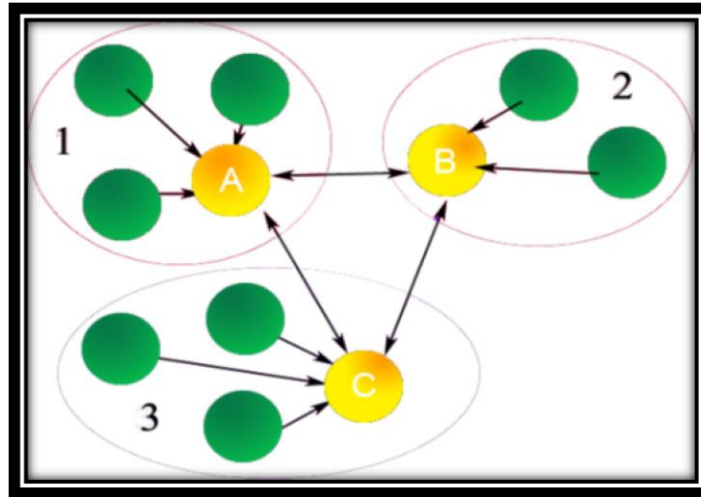


Figure I.10: Clustérisation d'un RCSF [11]

### I.3.3.4 Tolérance aux fautes, adaptabilité et fiabilité dans un RCSF

Les réseaux de capteurs sont requis pour fonctionner en s'adaptant aux changements environnementaux que les capteurs contrôlent. Les réseaux devraient être capables de s'autoorganiser en fonction des facteurs environnementaux. La fiabilité est la capacité de maintenir les fonctionnalités de réseau de capteurs sans la moindre interruption qui sera due à l'échec du nœud capteur. Ce dernier peut échouer en raison du manque d'énergie, de dommages physiques, de problèmes de communication, d'inactivité, ou d'interférence environnementale. De ce fait, le réseau devrait pouvoir détecter l'échec d'un nœud et s'organiser, se reconfigurer et récupérer des échecs de nœud sans desserrer aucune information.

### I.3.3.5 Passage à l'échelle dans un RCSF

Le nombre de capteurs utilisés dans les RCSFs peut varier de quelques entités à plusieurs dizaines de milliers. C'est d'ailleurs la principale utilité des réseaux de capteurs qui doivent pouvoir s'autoorganiser à une grande échelle et être efficace quel que soit leur nombre. Pour cela, les protocoles des RCSFs doivent être capables de fonctionner et de s'adapter selon le nombre de nœuds.

### I.3.3.6 Puissance de calcul dans un RCSF

Malgré les progrès récents dans la fabrication de capteurs de plus en plus puissants, les capteurs actuels souffrent d'un manque de puissance de calcul (par exemple seulement 16 MHz

de puissance et 128 Kilo-Octets de mémoire programmable pour un capteur MicaZ [12]). Cette faible puissance ne permet pas d'utiliser des algorithmes complexes, et particulièrement des algorithmes cryptographiques gourmands en ressources CPU. De plus, la vocation des capteurs sans fil est d'être en très grand nombre et leur utilisation dans des applications avec un nombre de nœuds élevé nécessite l'utilisation de capteurs bon marché, ce qui implique des capteurs avec une puissance de calcul très faible. La faiblesse de puissance de calcul est aussi préjudiciable pour le temps de réponse du réseau. Si l'on demande à un capteur d'effectuer de nombreux calculs, la latence va sensiblement augmenter.

### I.3.3.7 Bande passante limitée

Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Or, un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.

### I.3.3.8 Sécurité

En fonction de l'application, la sécurité peut être critique. Le réseau devrait permettre la détection des intrusions pour assurer un fonctionnement correct contre les mauvaises manipulations ou attaques. L'écoute, le brouillage, et les attaques de retransmission peuvent entraver ou empêcher l'opération. Par conséquent, le contrôle d'accès, l'intégrité des messages, et la confidentialité doivent être garantis.

### I.3.3.9 Qualité de Service

La qualité de service se réfère à la capacité du réseau à fournir des données fiables et à temps. Un grand nombre de service, à savoir, le débit ou la capacité de transport, ne sont pas généralement suffisant pour satisfaire un délai requis par une application, par conséquent, la vitesse de propagation de l'information peut être aussi cruciale que le débit. En plus de la capacité du réseau, de nombreux travaux importants dans les réseaux de capteurs sans fil se font pour la garantie de la QoS, essentiellement sur le délai. Par exemple, dans certaines applications de contrôle en temps réel, la valeur de l'information dégrade rapidement quand la latence augmente.

### I.3.3.10 Energie d'un RCSF

Les capteurs sont équipés de batteries, comme par exemple des piles LR6 dans le cas des MicaZ ou TelosB. L'énergie de ces batteries est limitée (plusieurs jours à quelques mois). De plus, les RCSFs quand ils sont déployés, ils sont souvent dans des zones difficiles d'accès pour l'homme et les capteurs sont en général déployés pour ne plus être modifiés. Il devient alors inenvisageable de vouloir changer les batteries des capteurs. Si le nombre de capteurs dépasse la centaine d'entités, il est encore plus difficile d'intervenir pour trouver le capteur défaillant et changer sa batterie. La consommation de l'énergie des réseaux de capteurs sans fil doit être la plus faible possible. Dans ce but, les capteurs actuels ont des périodes de veille durant leur inactivité pour préserver leur batterie. Enfin, les communications sont les actions qui coûtent le plus cher en termes d'énergie. Pour cela, il est donc fortement nécessaire de limiter le nombre de communications entre capteurs.

### I.3.4 Applications des RCSFs

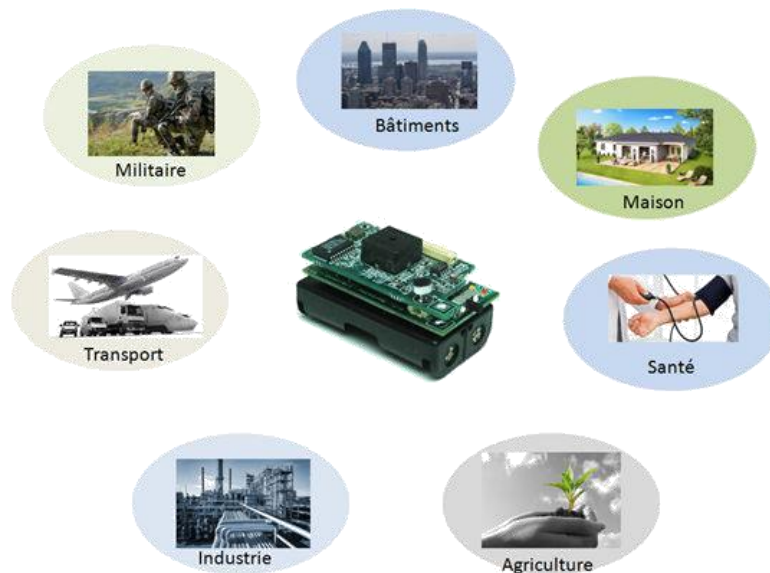


Figure I.11: Domaines d'applications

La miniaturisation des capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs de se développer dans plusieurs domaines d'application [13] [14]. Ils permettent aussi d'étendre les applications existantes. Les réseaux de capteurs peuvent se révéler très utiles dans de nombreuses applications lorsqu'il s'agit de collecter et de traiter des informations provenant de l'environnement. Parmi les domaines où ces réseaux peuvent offrir

les meilleures contributions, nous citons les domaines : militaire, surveillance, environnemental, médical, domestique, commercial, etc.

#### I.3.4.1 Applications militaires

Le faible coût et le déploiement rapide sont des caractéristiques qui ont rendu les réseaux de capteurs efficaces pour les applications militaires. Plusieurs projets ont été lancés pour aider les unités militaires dans un champ de bataille et protéger les villes contre des attaques, telles que les menaces terroristes. Le projet DSN au DARPA [15] était l'un des premiers projets dans les années 80 ayant utilisé les réseaux de capteurs pour rassembler des données distribuées. Les chercheurs du laboratoire national Lawrence Livermore ont mis en place le réseau WATS [16]. Ce réseau est composé de détecteurs des rayons gamma et des neutrons pour détecter et dépister les dispositifs nucléaires. Il est capable d'effectuer la surveillance constante d'une zone d'intérêt. Il utilise des techniques d'agrégation de données pour les rapporter à un centre intelligent. Ces chercheurs ont mis en place ensuite un autre réseau appelé JBREWS pour avertir les troupes dans le champ de bataille des attaques biologiques possibles. Un réseau de capteurs peut être déployé dans un endroit stratégique ou hostile, afin de surveiller les mouvements des forces ennemies, ou analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection des armes chimiques, biologiques ou radiations). L'armée américaine a réalisé des tests dans le désert de Californie.

#### I.3.4.2 Applications environnementales et agricoles

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

Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole. Cette expérimentation a été réalisée par Intel Research Laboratory and Agriculture and Agri-Food Canada sur une vigne à British Columbia. L'avantage principal de l'utilisation des RSCFs dans l'agriculture est l'absence de câblage ce qui réduit

considérablement le coût d'installation. Un autre avantage est la flexibilité de déploiement et la facilité d'entretien. En effet, les capteurs sont autonomes et nécessitent très peu d'intervention humaine sur les champs notamment dans le cas où les protocoles de communication sont tolérants aux pannes et supportent la mobilité des nœuds. Plusieurs projets [17], [18], [19] et [20] ont utilisé la technologie des RCSFs dans l'agriculture.

Nous pouvons également prendre l'exemple du projet AGROSENS, lancé par le laboratoire Heudiasyc [21], est une unité mixte de recherche entre l'Université de Technologie de Compiègne et le CNRS, qui a pour objectif l'étude et la conception d'une architecture RCSF pour le contrôle de l'environnement et le développement de pratiques d'agriculture de précision.

#### I.3.4.3 Applications médicales

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (surveillance de la glycémie, détection de cancers, etc.). Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, battements du cœur, etc. à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière [22]. Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient [23]. D'autre part, ces réseaux peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri, etc.) chez les personnes dépendantes (handicapées ou âgées).

#### I.3.4.4 Applications de surveillance

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de détection de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance.

#### I.3.4.5 Applications industrielles

Les machines de production peuvent être configurées et pilotées en interconnexion grâce à des systèmes d'acquisition et réseaux de capteurs sans fil, autonomes et communicants. Grâce à ce système, la connaissance précise et en continu de l'état de santé des machines est la garantie d'un maintien en conditions d'exploitation optimale (condition monitoring), d'interventions de maintenance réalisées juste au bon moment, et d'économies conséquentes.

Avec de tels systèmes, les opérationnels ont la possibilité de contrôler, anticiper et surveiller les machines à distance. Chocs, vibrations, déplacements, mouvements, paramètres du contexte environnemental (température, pression, etc.), autant de données stratégiques qu'il convient de collecter en temps réel, au cœur de l'outil de production bien souvent complexe et en milieu contraint.

#### I.3.4.6 Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des capteurs au processus de stockage et de livraison dans le domaine commercial. Le réseau ainsi formé pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un colis, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la localisation actuelle du paquet [24]. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts.

#### I.3.4.7 Applications domestiques

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les magnétoscopes, 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, l'alarme est déclenchée par le capteur anti-intrusion quand un étranger veut pénétrer dans la maison [25].



On a mis l'œil dans ce chapitre sur l'architecture, les spécificités, et les domaines d'applications des RCSFs. Dans le chapitre suivant on va citer des algorithmes utilisés dans le domaine de localisation dans les RCSFs.

# Chapitre II

Les algorithmes de localisation  
dans les réseaux de capteurs  
sans fil

## II.1 Introduction à la localisation dans Les RCSFs

Dans les RCSFs, les nœuds capteurs sont déployés dans l'environnement réel pour collecter les données de l'environnement physique environnant. Une fois les informations collectées, elles sont transmises du nœud capteur à la station de base où le chemin des informations est affiché. De plus, connaître la localisation géographique du nœud est très important, car si le nœud ne connaît pas sa localisation géographique, toute information est inutile. Notez que si un nœud juge son emplacement de manière incorrecte, cette erreur d'estimation se propage à travers le monde à travers le réseau et d'autres nœuds, conduisant à la propagation d'informations incorrectes sur l'emplacement des autres nœuds. Afin de déterminer la localisation d'un nœud, le capteur s'appuie principalement sur la distance entre un nœud qui connaît les coordonnées (localisation connue) et un nœud qui ne connaît pas les coordonnées (localisation inconnue). Comme solution typique, le GPS est le moyen le plus simple de localiser les nœuds. S'il y a un grand nombre de nœuds dans le réseau, cela deviendra très coûteux. Le thème de la localisation à faible coût a attiré certains chercheurs. Jusqu'à présent, de nombreux algorithmes ont été proposés dans la littérature [26] [27]. Ces algorithmes de positionnement peuvent être divisés en deux catégories, comme le montre la figure II.1.

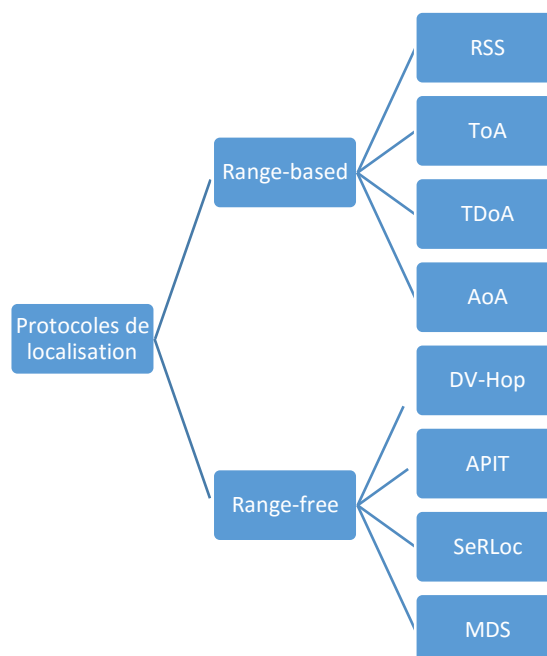


Figure II.1 : Les protocoles de localisation

## II.2 Concepts généraux sur le "range-based" et le "range-free"

Les algorithmes basés sur la distance « range-based » [28] utilisent des mesures de localisation telles que ToA, TDoA, RSS et AoA pour estimer la distance entre deux nœuds. La détection de proximité entre les nœuds est généralement la base des algorithmes sans distance [29].

Par contre, les algorithmes range-free [30] (DV-Hop, APIT, SeRLoc, ...) reposent sur le concept des informations de connectivité entre les différents nœuds.

Les informations de connectivité font référence aux informations du réseau local, telles que les coordonnées des ancres et le nombre de sauts pour chaque point d'ancrage. Les algorithmes basés sur la distance sont utilisés pour la trilatération afin de déterminer l'emplacement des points à l'aide de la géométrie du triangle. D'autres algorithmes utilisent l'angle et la distance pour trouver l'emplacement d'un point. De plus, la trilatération utilise la distance entre au moins deux points de référence [31].

## II.3 Algorithmes basés sur les distances "Range-based"

La classification basée sur la distance regroupe toutes les méthodes qui estiment les distances ou les angles entre les nœuds à l'aide d'informations sur la distance. L'utilisation de l'information de distance afin d'extraire les estimations de distance donne à l'algorithme une meilleure précision car l'information inter-nœuds obtenue est plus précise que celle obtenue avec des approches sans distance. Comme indiqué précédemment, un gain de précision entraîne généralement une augmentation du coût ou de la complexité. L'utilisation d'une approche basée sur la portée est plus recommandable lorsque la précision est l'objectif principal.

Dans cette sous-section, les différentes métriques du signal utilisées pour obtenir des estimations de distances sont présentées. Ces distances sont ensuite utilisées pour déterminer la position des nœuds. Les métriques comprennent ToA, TDoA, RSS et AoA [32].

### II.3.1 Intensité du signal reçu (RSS)

La technologie de télémétrie basée sur RSS repose sur le fait que la force du signal radio diminuera pendant le processus de propagation. Par conséquent, la compréhension de l'atténuation RF permet d'adapter la force du signal à la distance [33].

Une hypothèse commune est que la distance de propagation  $d$  est beaucoup plus grande que le carré de la taille de l'antenne divisé par la longueur d'onde. Dans un espace libre idéalisé, il est prouvé que le RSS est linéaire avec l'inverse du carré de la distance  $d$  entre l'émetteur et le récepteur. Soit  $P_r(d)$  la puissance reçue à la distance  $d$ .

La valeur de  $P_r(d)$  suit l'équation de Friis [34] :

$$P_r(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 P_t G_t G_r \quad (\text{II.1})$$

$P_t$ : La puissance émise.

$G_t$ : Gain d'antenne d'émission.

$G_r$ : Gain d'antenne de réception.

$\lambda$ : La longueur d'onde du signal d'émission exprimée en mètre.

En pratique, plusieurs facteurs tels que les ombres et les réflexions affectent la propagation des signaux radio et la puissance reçue. Malheureusement, ces facteurs dépendent de l'environnement et sont imprévisibles. Étant donné que l'effet d'ombre ne peut pas être suivi avec précision, il est généralement modélisé comme une variable aléatoire avec une distribution log-normale. Compte tenu du caractère aléatoire, la force du signal diminue avec la distance selon la loi de puissance. Le modèle utilisé pour la radio est le suivant [35] :

$$P_r(d) = P_0(d_0) - \eta 10 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (\text{II.2})$$

$P_r(d)$ : La puissance reçue à la distance  $d$ .

$P_0(d_0)$ : La puissance reçue à une certaine distance de référence  $d_0$ .

$\eta$ : L'exposant d'affaiblissement du trajet.

$X_\sigma$ : Une variable aléatoire logarithmique-normale avec une variance  $\sigma^2$  qui tient compte des effets d'affaiblissement.

Si l'indice d'atténuation d'un environnement donné est connu, la force du signal reçu peut être utilisée pour estimer la distance. Selon le modèle, la vraisemblance maximale de la distance  $d$  est estimée comme suit [36] :

$$\hat{d} = d_0 \left( \frac{P_r}{P_0(d_0)} \right)^{-1/\eta} \quad (\text{II.3})$$

De plus, la relation entre la distance estimée et la distance au sol est la suivante :

$$\hat{d} = d 10^{-\frac{X_\sigma}{10\eta}} = d e^{-\frac{\alpha X_\sigma}{\eta}} \quad (\text{II.4})$$

Où  $\alpha = \ln 10 / 10$ . Donc, la valeur attendue de la distance estimée est :

$$E(\hat{d}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} d e^{-\alpha X_\sigma / \eta} e^{-X_\sigma^2 / 2\sigma^2} dX_\sigma = d e^{(\alpha^2/2)(\sigma^2/\eta^2)} \quad (\text{II.5})$$

L'estimation du maximum de vraisemblance est donc biaisée par rapport à la distance de vérité.

Par conséquent, l'estimation sans biaisée est :

$$\hat{d} = d_0 \left( \frac{P_r}{P_0(d_0)} \right)^{-1/\eta} e^{(\alpha^2/2)(\sigma^2/\eta^2)}. \quad (\text{II.6})$$

Le bruit de télémétrie est dû au fait que la propagation radio a tendance à être très dynamique dans des environnements complexes. Bien que la télémétrie basée sur le RSS contienne des bruits de l'ordre de plusieurs mètres (ou des performances encore pires) [37], elle est largement utilisée dans de nombreux systèmes du monde réel parce que le RSS est une solution relativement "bon marché" sans matériel spécial, puisque tous les nœuds sont censés être équipés de radios. On pense qu'une analyse physique plus attentive de la propagation radio pourrait permettre une meilleure utilisation des données RSS [33].

### II.3.1.1 Techniques de positionnement basées sur le profilage RSS

Celles-ci utilisent directement les données RSS pour l'estimation de la position. Dans les environnements intérieurs, faire correspondre RSS aux mesures de distance peut introduire d'énormes erreurs, car le RSS est grandement affecté par les ombres et les trajets multiples. Cependant, la distribution RSS d'un groupe de nœuds d'ancrage est relativement stable dans l'espace, de sorte que le vecteur RSS (défini comme la zone de couverture de RSS) mesuré par un nœud inconnu révèle l'emplacement physique du nœud. En comparant l'empreinte RSS avec les données de profil, l'emplacement du nœud inconnu peut être estimé. Sur la base du schéma d'analyse des performances, les méthodes existantes peuvent être divisées en deux catégories :

#### a- Schéma de profilage hors ligne

Un schéma de profilage hors ligne typique est RADAR [37], qui positionne un nœud inconnu en construisant une carte de localisation RSS. RADAR comprend deux étapes :

1. La détection de la carte hors ligne : RADAR collecte la distribution spatiale du RSS des ancres pour construire une carte de localisation du RSS. Plus précisément, les opérateurs du système effectuent au préalable une étude du site en enregistrant les valeurs RSS à

chaque emplacement dans une zone intéressante. Le RSS à un endroit donné varie de manière assez significative (jusqu'à 5 dBm) en fonction de l'orientation de l'utilisateur, c'est-à-dire de la direction à laquelle il fait face. RADAR prend donc en compte la direction et enregistre le tuple suivant à chaque point d'échantillonnage  $(t, x, y, d)$ , où  $t$  désigne l'horodatage de la mesure,  $(x, y)$  et  $d$  indiquent respectivement la position et la direction de la mesure.

2. Le positionnement du nœud en ligne : Chaque nœud inconnu mesure d'abord le RSS entre les nœuds d'ancrage situés dans sa portée de communication, et crée ainsi sa propre empreinte RSS. Ensuite, il transmet l'empreinte RSS à la station centrale. À l'aide de cette empreinte RSS, la station centrale fait correspondre le vecteur d'intensité du signal présenté à la carte RSS-localisation-direction, en utilisant la méthode du plus proche voisin. En d'autres termes, l'emplacement d'un point échantillon, dont le vecteur RSS est le plus proche de celui du nœud inconnu, est choisi pour être l'emplacement estimé du nœud non ancré.

En plus des avantages simples, RADAR peut également gérer correctement la mobilité des nœuds inconnus. Cependant, la précision de ce schéma est affectée par la dynamique environnementale [33].

### **b- Schéma de profilage en ligne**

Une façon de résoudre le problème de la dynamique environnementale, qui est une caractéristique principale de la communication sans fil est d'utiliser la carte en ligne pour positionner les nœuds inconnus, appelée LANDMARC [38]. La conception de LANDMARC est basée sur la technologie RFID, qui est un moyen de stocker et de récupérer des données par transmission électromagnétique à un circuit intégré compatible RF.

Le positionnement basé sur la carte en ligne n'a pas besoin de collecter la distribution RSS au préalable. LANDMARC utilise l'idée d'exploiter des balises de référence supplémentaires à emplacement fixe pour faciliter le calibrage de la localisation. Ces balises de référence servent de points de référence dans le système (comme les points de repère dans notre vie quotidienne).

L'avantage de cette conception est d'obtenir une grande précision de localisation à partir du coût des étiquettes plutôt que des lecteurs, car les lecteurs RFID sont beaucoup plus chers que les étiquettes RFID.

Les étiquettes de référence forment une carte en ligne pour le calcul de la localisation. Comme le montre la figure II.3, les étiquettes de référence pré-déployées couvrent bien la zone cible et fournissent uniformément des données échantillons pour localiser les étiquettes de suivi. Notez que les lecteurs RF peuvent lire toutes les étiquettes de la zone cible, y compris les étiquettes de référence et les étiquettes de suivi [33]

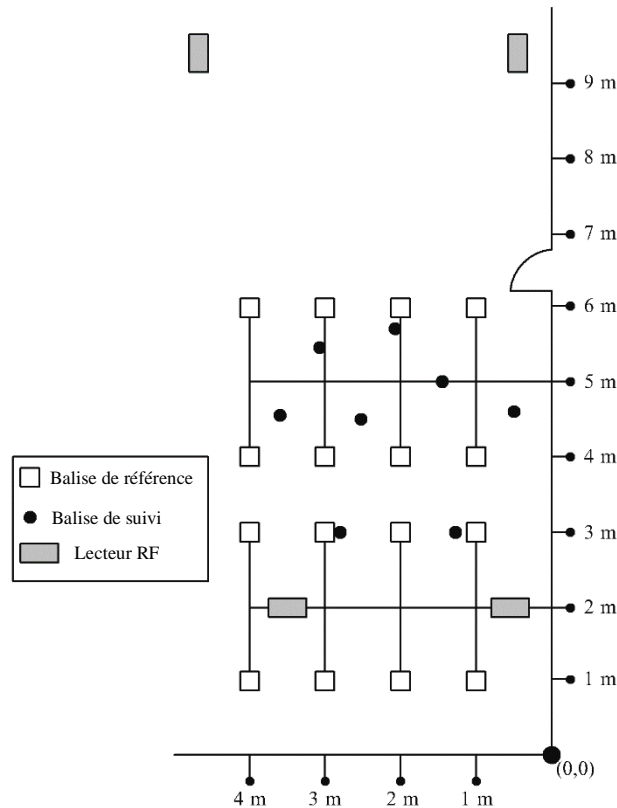


Figure II.2: Déploiement du LANDMARC [33]

### II.3.2 Temps d'arrivée (ToA)

Cette méthode enregistre le temps d'arrivée. Le délai de propagation peut être calculé comme  $t_i - t_0$  où  $t_0$  et  $t_i$  sont les instants de l'émission et de réception du signal respectivement. Cette méthode peut être appliquée à de nombreux signaux différents, tels que RF, acoustique, infrarouge [39]. La distance entre deux nœuds (récepteur et émetteur) peut être déterminée comme suit [40] :

$$d = (t_i - t_0) \times V \quad (\text{II.7})$$

Où  $V$  : la vitesse du signal.

Il existe deux catégories de mesures de distance basées sur la ToA :



### II.3.2.1 Estimation unidirectionnelle

La présence d'une synchronisation précise des horloges de l'émetteur et du récepteur est très nécessaire. Dans cette estimation, le récepteur calcule sa propre position [31].

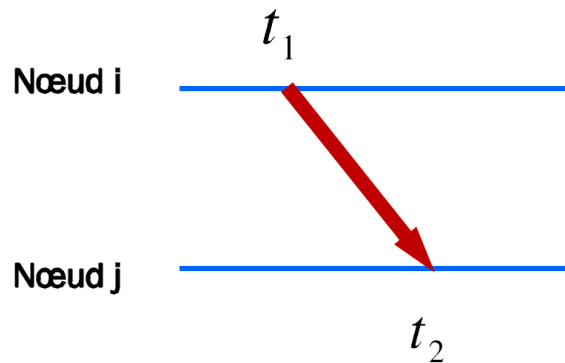


Figure II.3: ToA unidirectionnel [31]

### II.3.2.2 Estimation bidirectionnelle

Cette estimation ToA est préférée car les mesures du temps aller-retour sont faites au niveau du dispositif émetteur qui calcule l'emplacement du récepteur (voir figure II.4) [31].

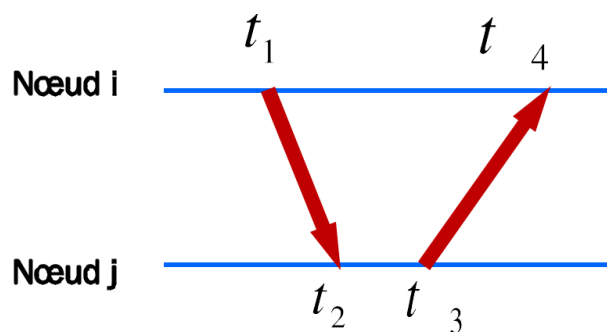


Figure II.4: ToA bidirectionnel [31]

### II.3.3 Différence de temps d'arrivée (TDoA)

L'approche TDoA utilise deux signaux qui voyagent à des vitesses différentes. Cette approche permet au récepteur de déterminer son emplacement et peut fournir des mesures très précises sans la nécessité de synchronisation des horloges de l'émetteur et du récepteur. Le récepteur peut déterminer la distance par :

$$d_{i-j} = (v_1 - v_2) (t_4 - t_2 - t_{delay}) \quad (II.8)$$

Où :

$$t_{delay} = t_3 - t_1$$

L'inconvénient de cette méthode est le besoin de matériel supplémentaire [31].

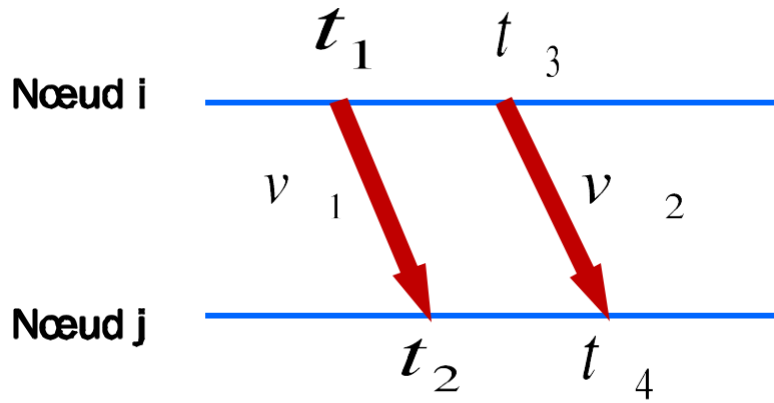


Figure II.5: TDOA [31]

### II.3.3.1 Techniques de positionnement basées sur la TDoA

La mesure TDoA donne la différence de l'heure d'arrivée du signal aux différents nœuds de référence. La métrique de TDoA  $\Delta t_{ij}$  et les coordonnées des nœuds de référence  $i$  et  $j$  définissent une branche hyperbolique, dont les foyers se trouvent à la position des nœuds de référence  $i$  et  $j$ . Par conséquent, le nœud inconnu doit être situé sur l'hyperbole. Par

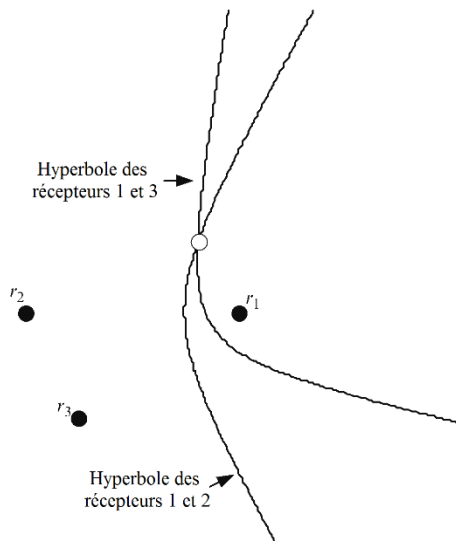


Figure II.6: Calcul de la localisation par TDoA [33]

conséquent, le positionnement basé sur la mesure TDoA est également appelé positionnement hyperbolique. Dans l'espace bidimensionnel  $R^2$ , au moins trois nœuds de référence doivent être mesurés pour déterminer de manière unique la position du nœud inconnu, comme le montre la figure II.6.

La valeur de TDoA associée à un nœud de référence  $i$  est  $\Delta t_i = t_i - t_1$  (différence entre les arrivées du nœud de référence 1). Soit :

$(x_0, y_0)$  : L'emplacement du nœud inconnu.

$d_i$  : La distance entre le nœud inconnu et le nœud de référence  $i$ .

$(x_i, y_i)$  : L'emplacement du nœud de référence  $i$ .

$n$  : Nombre total de nœuds de référence.

Nous avons alors les relations de base suivantes :

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \\ d_2^2 &= (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 \\ &\vdots \\ d_n^2 &= (x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

Soit  $\Delta d_i = c\Delta t_i = d_i - d_1$ , où  $c$  est la vitesse du signal utilisé par le nœud inconnu. Alors, les équations ci-dessus peuvent être réécrites sous forme de :

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \\ (d_1 + \Delta d_2)^2 &= (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 \\ &\vdots \\ (d_1 + \Delta d_n)^2 &= (x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

Par soustraction de la première équation avec toutes les autres équations :

$$\begin{aligned} -(x_2 - x_1)x_0 - (y_2 - y_1)y_0 &= \Delta d_2 d_1 + \frac{1}{2}(\Delta d_2^2 - x_2^2 - y_2^2 + x_1^2 + y_1^2) \\ -(x_3 - x_1)x_0 - (y_3 - y_1)y_0 &= \Delta d_3 d_1 + \frac{1}{2}(\Delta d_3^2 - x_3^2 - y_3^2 + x_1^2 + y_1^2) \\ &\vdots \\ -(x_n - x_1)x_0 - (y_n - y_1)y_0 &= \Delta d_n d_1 + \frac{1}{2}(\Delta d_n^2 - x_n^2 - y_n^2 + x_1^2 + y_1^2) \end{aligned} \quad (\text{II.11})$$

L'écriture des équations sous forme matricielle est :

$$H_x = d_1 a + b, \quad (\text{II.12})$$

Où

$$H = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}, \quad a = \begin{bmatrix} -\Delta d_2 \\ -\Delta d_3 \\ \vdots \\ -\Delta d_n \end{bmatrix}, \quad b = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Delta d_2^2 - x_2^2 - y_2^2 + x_1^2 + y_1^2 \\ \Delta d_3^2 - x_3^2 - y_3^2 + x_1^2 + y_1^2 \\ \vdots \\ \Delta d_n^2 - x_n^2 - y_n^2 + x_1^2 + y_1^2 \end{bmatrix}$$

L'estimation par les moindres carrés de cette équation est donnée par :

$$\hat{x} = (H^T H)^{-1} H^T (d_1 a + b) \quad (\text{II.13})$$

Dans ce résultat, le paramètre  $d_1$  est inconnu. Notons que nous avons :

$$d_1^2 = (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \quad (\text{II.14})$$

Par substitution de ce résultat, on obtient une équation quadratique de  $d_1$ . En résolvant  $d_1$  et en substituant la racine positive dans l'estimation des moindres carrés, on obtient la solution finale pour  $x$ , c'est-à-dire l'estimation de l'emplacement du nœud inconnu [33].

### II.3.4 Angle d'arrivée (AoA)

La méthode la plus courante consiste à utiliser un réseau de capteurs et à employer des techniques de traitement du signal au niveau des nœuds capteurs. Dans ce cas, chaque nœud capteur est composé de deux ou plusieurs capteurs individuels (microphones pour les signaux acoustiques ou antennes pour les signaux RF) dont les emplacements par rapport au centre du nœud sont connus. Un réseau de microphones en forme de Y à quatre éléments est illustré à la figure II.7. L'AoA est estimée à partir des différences de temps d'arrivée d'un signal transmis à chacun des éléments du réseau de capteurs. L'estimation est similaire à l'estimation du temps de propagation abordée dans la section sur les mesures du ToA, mais elle est généralisée au cas où il y a plus de deux éléments du réseau. Lorsque le signal incident est à bande étroite (c'est-à-dire que sa largeur de bande est bien inférieure à sa fréquence centrale), un retard temporel  $\tau$  est lié à un retard de phase  $\varphi$  par  $\varphi = 2\pi f_c \tau$  où  $f_c$  est la fréquence centrale. Les estimateurs d'angle d'attaque en bande étroite sont souvent formulés sur la base du retard de phase [41].

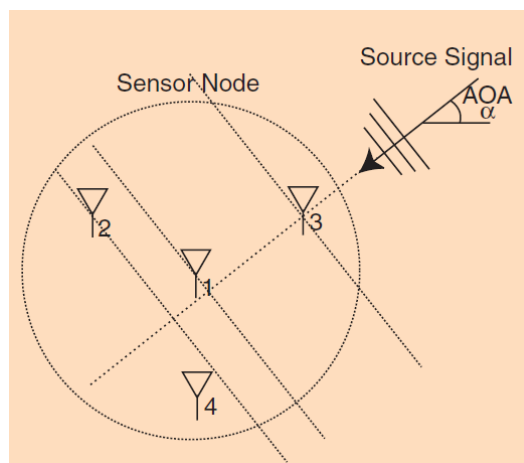


Figure II.7: Un réseau de microphones en forme de Y à quatre éléments [41]

Ces méthodes peuvent obtenir une précision de quelques degrés [42]. Une technique de localisation très simple, impliquant trois balises de référence rotatives à la limite d'un réseau de capteurs fournissant une localisation pour tous les nœuds intérieurs, est décrite dans [43] [33].

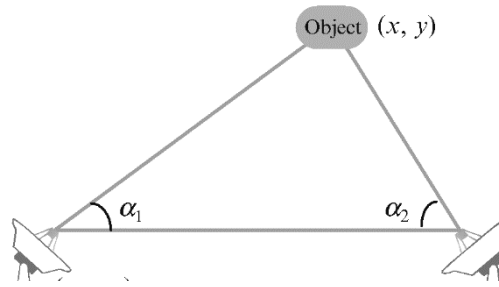


Figure II.8: Mesure d'angle [33]

L'inconvénient de cette estimation est le matériel qui est plus coûteux que le matériel de télémétrie ToA ou TDoA, puisque chaque nœud doit être équipé d'un haut-parleur et de plusieurs microphones. En outre, la nécessité d'une séparation spatiale entre les microphones est difficile à prendre en compte dans des dispositifs de petite taille [33].

### II.3.4.1 Techniques de positionnement basées sur l'AoA [33]

La mesure AoA donne les informations de relèvement de deux nœuds, comme le montre la figure II.9. Soit  $(x_0, y_0)$  l'emplacement du nœud inconnu à estimer à partir de la mesure AoA  $\alpha_i, 1 \leq i \leq n$ ; où  $n$  est le nombre total de nœuds de référence.

Soit  $(x_i, y_i)$  l'emplacement connu du nœud de référence  $i, \theta_i(p)$  désigne l'orientation d'un nœud situé en  $\vec{x} = (x, y)$ .

$$\tan \theta_i(\vec{x}) = \frac{y-y_i}{x-x_i}, \quad 1 \leq i \leq n \tag{II.15}$$

Supposons que les relèvements mesurés du nœud de référence  $i$  soient corrompus par des bruits additifs  $\varepsilon_i; 1 \leq i \leq n$ ; que l'on suppose être des bruits gaussiens de moyenne nulle avec des matrices de covariance  $\sigma^2$ , c'est-à-dire :

$$\alpha_i = \theta_i(x_0) + \varepsilon_i, \quad 1 \leq i \leq n \tag{II.16}$$

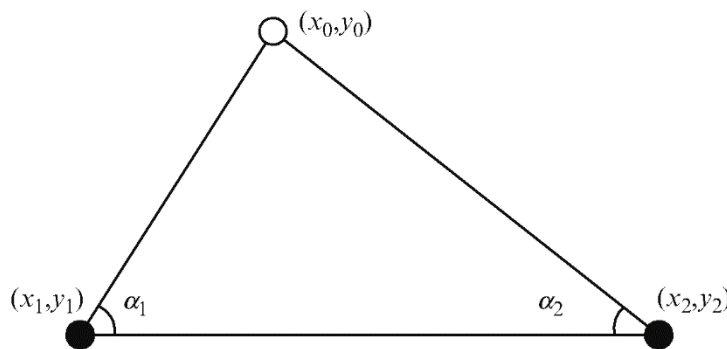


Figure II.9: Calcul de la localisation par la mesure de l'AoA [33]

Lorsque les nœuds de référence sont identiques et beaucoup plus proches les uns des autres que du nœud inconnu, les variances des erreurs de mesure des roulements sont égales, c'est-à-dire que  $\sigma_i^2 = \sigma^2$  ;  $1 \leq i \leq n$ . L'estimateur du maximum de vraisemblance de l'emplacement du nœud inconnu est donné par :

$$\hat{x} = \arg \min \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_i(\hat{x}) - \alpha_i)^2}{\sigma_i^2} \quad (\text{II.17})$$

Ce problème de minimisation non linéaire peut être résolu par une itération de Newton-Gauss [44].

Une autre approche repose sur l'hypothèse que l'erreur de mesure est suffisamment faible pour que  $\varepsilon_i \approx \sin(\varepsilon_i)$ . Dans ce cas, la fonction de coût ci-dessus devienne :

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\sin^2(\theta_i(\hat{x}) - \alpha_i)}{\sigma_i^2} \quad (\text{II.18})$$

D'après  $d_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}$  et :

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{[(y_0 - y_i) \cos \alpha_i - (x_0 - x_i) \sin \alpha_i]^2}{\sigma_i^2 d_i^2} = \frac{1}{2} (A_{\rightarrow} x - b)^T R^{-1} S^{-1} (A_{\rightarrow} x - b) \quad (\text{II.19})$$

La fonction de coût devient :

$$\sin(\theta_i(\hat{x}) - \alpha_i) = \sin \theta_i(\hat{x}) \cos \alpha_i - \cos \theta_i(\hat{x}) \sin \alpha_i = \frac{(y_0 - y_i) \cos \alpha_i - (x_0 - x_i) \sin \alpha_i}{d_i} \quad (\text{II.20})$$

Où :

$$A = \begin{bmatrix} \sin \alpha_1 & -\cos \alpha_1 \\ \vdots & \vdots \\ \sin \alpha_n & -\cos \alpha_n \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1 \sin \alpha_1 - y_1 \cos \alpha_1 \\ \vdots \\ x_n \sin \alpha_n - y_n \cos \alpha_n \end{bmatrix}$$

$$R = \text{diag}\{d_1^2, \dots, d_n^2\}$$

$$S = \text{diag}\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2\}$$

Cette méthode suppose implicitement qu'une estimation grossière de  $R$  peut être obtenue. Puisque la fonction de coût dépend faiblement de  $R$ , l'approximation n'affectera pas significativement la solution. Sous ces hypothèses, la solution de coût minimum par rapport à  $x$  est donnée par :

$$\hat{x} = (A^T R^{-1} S^{-1} A)^{-1} A^T R^{-1} S^{-1} b \quad (\text{II.21})$$

## II.3.5 Mesure du voisinage

L'approche la plus élémentaire est peut-être celle de la proximité d'un voisin. Le principal avantage de cette approche est la simplicité du calcul, qui consiste à décider simplement si deux nœuds sont à portée de réception l'un de l'autre. Un ensemble de nœuds de référence est placé dans le réseau avec des sous-régions qui ne se chevauchent pas (ou presque). Les nœuds de référence émettent périodiquement des balises comprenant leurs identifiants de localisation. Un nœud inconnu utilise les informations de localisation reçues comme sa propre localisation, réalisant ainsi une localisation au niveau du parcours.

Les informations de voisinage peuvent être plus utiles lorsque la densité des nœuds de référence est suffisamment élevée pour qu'il y ait plusieurs nœuds de référence à portée d'un nœud inconnu. Supposons qu'il existe  $k$  nœuds de référence à proximité du nœud inconnu (figure II.10). Nous utilisons le centroïde du polygone construit par les  $k$ -nœuds de référence comme position estimée du nœud inconnu. Il s'agit en fait d'une approximation par les  $k$  plus proches voisins dans laquelle tous les nœuds de référence ont le même poids.

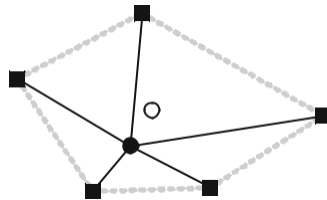


Figure II.10: Proximité des  $k$ -voisins [33]

Cette technique de centroïde simple a été étudiée à l'aide d'un modèle dans lequel chaque nœud a une portée circulaire simple  $R$  dans un maillage carré infini de nœuds de référence espacés d'une distance  $d$  [45]. Il est montré par simulation que, lorsque le rapport de recouvrement  $R/d$  augmente, l'erreur moyenne de localisation diminue [33].

## II.3.6 Techniques de positionnement par multilatération

### II.3.6.1 Trilatération

Une forme particulière de multilatération, cette méthode détermine la position d'un nœud à partir de l'intersection de 3 cercles de 3 nœuds d'ancrage qui sont formés sur la base des mesures de distance entre ses voisins. Le rayon du cercle est égal à la mesure de la distance, comme le montre la figure II.11.

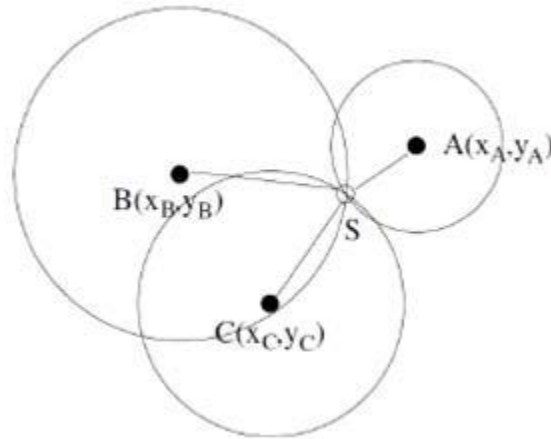


Figure II.11: Technique de trilatération [47]

Cependant, dans un environnement réel, la mesure de la distance n'est pas parfaite ; par conséquent, plus de trois nœuds sont nécessaires pour la localisation [46] [47].

Le principe de cette technique [48] est basé sur les propriétés du triangle, afin d'estimer l'emplacement des nœuds réguliers. Cette méthode nécessite au moins trois ancres qui connaissent leurs positions.

La technique de trilatération exploite l'information de ces trois ancres et utilise un centre de localisation vers le nœud régulier, comme le montre la figure II.12.

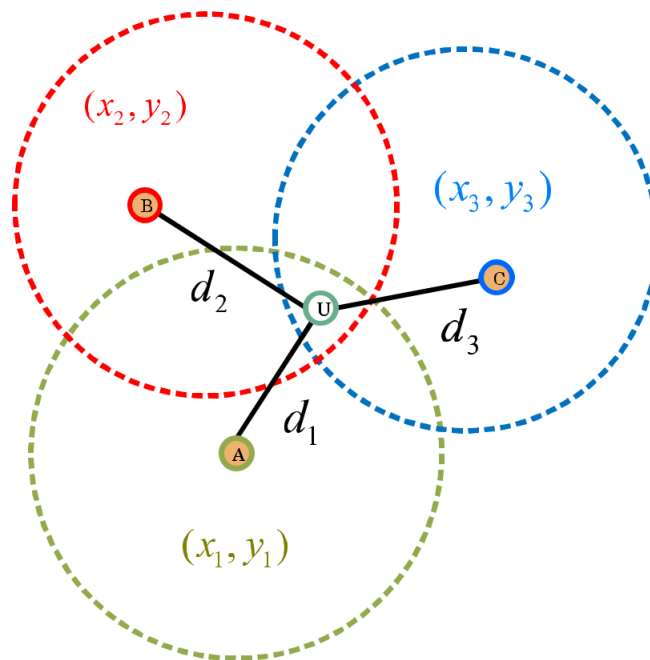


Figure II.12: Exemple de méthode de trilatération [31]

Le point intérieur estime son emplacement à l'aide des coordonnées obtenues des trois ancres et correspondant aux distances par rapport à chacune d'elles. En effet, l'intersection des trois



cercles est considérée comme l'emplacement du point intérieur d'un triangle. Le cercle est déterminé par l'ancre en tant que centre et la distance entre le centre et le point intérieur est la portée de communication (ex : rayon du cercle). Comme le montre la figure II.12 dans une telle situation, les nœuds d'ancrage sont les trois points qui ont une étiquette appelée  $A, B$  et  $C$  avec des coordonnées spécifiques, respectivement  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  et  $(x_3, y_3)$  et le nœud régulier  $U$  a des coordonnées  $(X, Y)$ . Ensuite, les distances entre le nœud régulier et les nœuds d'ancrage peuvent être calculées comme :

$$\begin{aligned}(d_1)^2 &= (X - x_1)^2 + (Y - y_1)^2, \\(d_2)^2 &= (X - x_2)^2 + (Y - y_2)^2, \\(d_3)^2 &= (X - x_3)^2 + (Y - y_3)^2,\end{aligned}\tag{II.22}$$

Après linéarisation de ce système ci-dessus, on obtient :

$$AP = -\frac{1}{2B},\tag{II.23}$$

Où  $P = [X, Y]$ ,  $A$  est une matrice de dimension  $(N_a - 1) \times 2$ , où  $N_a$  est le nombre d'ancres existant dans le réseau :

$$A = 2 \times \begin{bmatrix} (x_1 - x_3) & (y_1 - y_3) \\ (x_2 - x_3) & (y_2 - y_3) \end{bmatrix}\tag{II.24}$$

Et  $B$  est un vecteur de dimension  $(N_a - 1) \times 1$  défini comme suit :

$$B = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_3^2 - x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2 \\ d_2^2 - d_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2 \end{bmatrix}\tag{II.25}$$

Puisque  $A$  est une matrice non inversible,  $\hat{X}$  et  $\hat{Y}$  peuvent être estimés avec le pseudo-inverse de  $A$  comme suit :

$$P \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} \times (A^T B)\tag{II.26}$$

Par conséquent, le nœud régulier est capable d'obtenir une première estimation de ses coordonnées en se basant sur les définitions de  $A$  et  $B$  qui dépendent d'informations locales.

### II.3.6.2 Multilatération

La technique de trilatération ne peut pas estimer avec précision la position d'un nœud si les mesures de distance sont bruitées. Une solution possible consiste à utiliser l'estimation ML, qui inclut les mesures de distance de plusieurs nœuds voisins, comme le montre la figure II.13.

Cette méthode vise à minimiser les différences entre les distances mesurées et les distances estimées [47] [49].

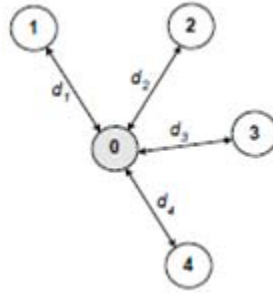


Figure II.13: Technique de multilatération [47]

En pratique, les mesures de distance contiennent inévitablement des erreurs, ce qui fait que les cercles ne se croisent pas toujours en un seul point. Ce problème peut être résolu par une solution numérique à un système linéaire surdéterminé [50]. Supposons qu'un nœud inconnu soit situé à  $(x_0, y_0)$  et qu'il soit capable d'obtenir les estimations de distance  $d'_i$  au  $i$ -ième nœud de référence situé à  $(x_i, y_i)$ ,  $1 \leq i \leq n$ , où  $n$  est le nombre total de nœuds de référence. Soit  $d_i$  la distance euclidienne réelle entre le nœud inconnu et l' $i$ ème nœud de référence, à savoir [33] :

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (\text{II.27})$$

Ainsi, la différence entre les distances mesurées et réelles peut être représentée par :

$$\rho_i = d'_i - d_i \quad (\text{II.28})$$

La méthode des moindres carrés est l'une des méthodes conçues pour traiter le bruit de télémétrie. Elle permet de déterminer la valeur de  $(x_0, y_0)$  en minimisant la valeur de  $\sum_{i=1}^n \rho_i^2$ .

Chaque mesure détermine une équation de la position du nœud inconnu, on a donc :

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \\ d_2^2 &= (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 \\ &\vdots \\ d_n^2 &= (x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 \end{aligned} \quad (\text{II.29})$$

Par soustraction entre la première équation et toutes les autres équations, on obtient :

$$\begin{aligned} d_2^2 - d_1^2 &= x_2^2 - x_1^2 - 2(x_2 - x_1)x_0 + y_2^2 - y_1^2 - 2(y_2 - y_1)y_0 \\ d_3^2 - d_1^2 &= x_3^2 - x_1^2 - 2(x_3 - x_1)x_0 + y_3^2 - y_1^2 - 2(y_3 - y_1)y_0 \\ &\vdots \\ d_n^2 - d_1^2 &= x_n^2 - x_1^2 - 2(x_n - x_1)x_0 + y_n^2 - y_1^2 - 2(y_n - y_1)y_0 \end{aligned} \quad (\text{II.30})$$

Par réorganisation, on obtient une matrice comme suit :

$$\begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_2^2 + y_2^2 - d_2^2 - (x_1^2 + y_1^2 - d_1^2) \\ x_3^2 + y_3^2 - d_3^2 - (x_1^2 + y_1^2 - d_1^2) \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 - d_n^2 - (x_1^2 + y_1^2 - d_1^2) \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Donc,

$$H_x = b, \quad (\text{II.32})$$

Où

$$H = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}, \quad b = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_2^2 + y_2^2 - d_2^2 - (x_1^2 + y_1^2 - d_1^2) \\ x_3^2 + y_3^2 - d_3^2 - (x_1^2 + y_1^2 - d_1^2) \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 - d_n^2 - (x_1^2 + y_1^2 - d_1^2) \end{bmatrix}$$

La solution des moindres carrés de cette équation est donnée par :

$$\hat{x} = (H^T H)^{-1} H^T b \quad (\text{II.33})$$

## II.4 Algorithmes à portée libre "Range-free"

Les algorithmes "*range-free*" sont plus économiques en matériel car ils se contentent de l'information de connectivité liée à la portée [39].

Ces algorithmes n'ont pas besoin d'informations sur la distance absolue ou l'angle entre les nœuds de capteurs, mais uniquement sur la connectivité du réseau et d'autres informations. Les méthodes sans distance sont donc plus économiques, rentables et réalisables pour les réseaux de capteurs sans fil à grande échelle. Leur précision est inférieure à celle des méthodes basées sur la portée, mais elles répondent aux exigences de nombreuses applications. C'est pourquoi les méthodes sans distance ont attiré beaucoup d'attention, comme la méthode DV-Hop, APIT, MDS-MAP, etc. [51].

### II.4.1 Méthode de localisation DV-Hop

La méthode DV-Hop est proposée par Niculescu et Nath [52] [53]. Son idée de base est que la distance entre le nœud inconnu et le nœud d'ancrage est exprimée par le produit de la distance de saut moyenne et du nombre de sauts. La mise en œuvre de la méthode comprend trois étapes [39] [51] :

- 1) Chaque nœud ancrage émet un paquet de donnée comporte la position d'ancrage et le nombre de sauts  $n$  initialisée à 0. Chaque nœud reçoit ce paquet, il conserve la

position de l'ancre ainsi que le nombre de sauts reçu  $n_k = n$  dans sa base de données, incrémente ce dernier (i.e.  $n = n + 1$ ), et il diffuse ensuite le paquet résultant. Une fois que ce paquet est reçu par un autre nœud, ses informations sont vérifiées (position et nombre de sauts). Si les informations de l'ancre sont déjà disponibles et la valeur de nombre de sauts reçue est plus petite que celle précédemment stockée  $n_k$ , le nœud met à jour ce dernier, incrémente  $n$  par 1, puis rediffuse le paquet résultant. Si  $n_k$  est plus petit que  $n$ , le paquet reçu sera ignoré. Ces mises à jour et les diffusions ultérieures se poursuivront jusqu'à ce que tous les chemins les plus courts soient trouvés. Grâce à ce mécanisme, tous les nœuds du réseau obtiennent la distance la plus courte, en nombre de sauts, vers chaque ancre.

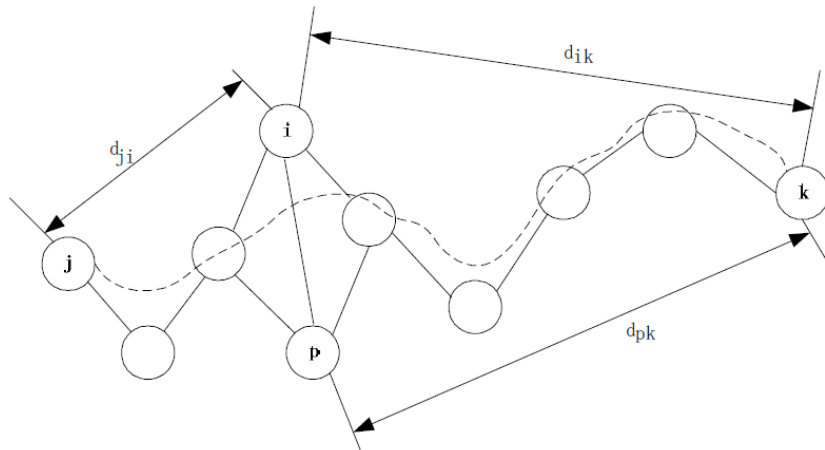


Figure II.14: Une instance de l'algorithme DV-Hop [54]

- 2) Dans la deuxième étape, lorsque l'ancre  $i$  obtient la valeur du nombre de sauts vers d'autres ancres, elle estime la taille moyenne d'un saut, puis la diffuse sur l'ensemble du réseau. Après avoir reçu la taille du saut, tous les nœuds multiplient la taille du saut par la valeur du nombre de sauts pour obtenir la distance physique au point d'ancrage. Estimez ensuite la taille moyenne du saut par l'ancre  $i$  est estimée comme suit :

$$HopSize_i = \frac{\sum_{j \neq i} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum_{j \neq i} h_{ij}} \quad (\text{II.34})$$

$(x_i, y_i)$ ,  $(x_j, y_j)$  sont les coordonnées du point d'ancrage  $i$  et du point d'ancrage  $j$ , et  $h_{ij}$  est le nombre de sauts entre le point d'ancrage  $i$  et le point d'ancrage  $j$ . Une fois le nombre de sauts moyen calculé, chaque nœud d'ancrage utilise une

inondation contrôlée pour diffuser son nombre de sauts sur le réseau. Le nœud inconnu reçoit des informations sur la taille du saut et enregistre le premier. En même temps, ils transmettent la taille du saut à leurs nœuds voisins. Ce schéma peut garantir que la plupart des nœuds disposent de la plus petite taille de saut entre les nœuds d'ancrage. Lorsque le nœud inconnu accepte les informations du nœud d'ancrage, il calculera la distance entre celui-ci et le nœud d'ancrage selon la formule suivante :

$$d_{ij} = HopSize_j \times hop_{ij} \quad (II.35)$$

$hop_{ij}$ : Le nombre minimal de sauts entre l'ancre  $i$  et le nœud inconnu  $j$ .

- 3) Chaque nœud inconnu calcule ses coordonnées de localisation. Soit  $(x, y)$  l'emplacement du nœud inconnu  $P$  et  $(x_i, y_i)$  l'emplacement connu de l' $i$ -ème nœud d'ancrage récepteur. Si  $d_i$  est la distance entre l' $i$ -ème nœud d'ancrage et les nœuds inconnus  $P$ , nous avons alors :

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (II.36)$$

## II.4.2 L'algorithme APIT

La technique APIT est une approche de l'estimation de zone [55] similaire à l'APS (qui est basé sur DV-hop [56]). Elle repose sur la présence de plusieurs nœuds d'ancrage qui

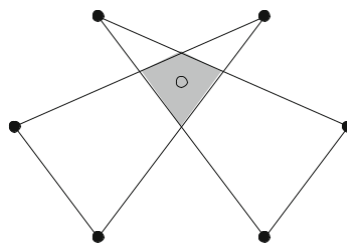


Figure II.15: Mesures de surface [33]

connaissent leurs propres positions. Toute combinaison de trois points d'ancrage constitue une région triangulaire et la présence d'un nœud à l'intérieur ou à l'extérieur d'une telle région permet à un nœud d'affiner son possible [52].

L'APIT se compose de deux processus clés :

### II.4.2.1 L'intersection des triangles

Basé sur la géométrie. On suppose que les nœuds entendent un nombre assez important de balises. Un nœud forme un certain nombre de "triangles de référence" : le triangle formé par trois références arbitraires.

### II.4.2.2 Le test PIT

Le nœud décide ensuite s'il se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur d'un triangle donné par test PIT. Une fois le processus terminé, le nœud trouve l'intersection des triangles de référence qui le contiennent et choisit le centroïde comme estimation de sa position (figure II.15). Au cours du processus, l'APIT ne suppose pas que les nœuds puissent atteindre ces balises.

Le test PIT est basé sur la géométrie. Pour un triangle donné avec des points  $A, B$  et  $C$ , un point  $M$  est à l'extérieur du triangle  $ABC$ , s'il existe une direction telle qu'un point adjacent à  $M$  est plus loin/plus près des points  $A, B$  et  $C$  simultanément. Sinon,  $M$  est à l'intérieur du triangle  $ABC$ . Malheureusement, étant donné que les nœuds ne peuvent généralement pas se déplacer, un test PIT approprié est proposé sur la base de deux hypothèses. La première est que les mesures de distance sont monotones et calibrées pour être comparables mais ne sont pas nécessaires pour produire des estimations de distance. La seconde suppose une densité de nœuds suffisante pour estimer le mouvement des nœuds. Si aucun voisin de  $M$  n'est plus loin/plus proche des trois ancres  $A, B$  et  $C$  simultanément,  $M$  suppose qu'il se trouve à l'intérieur du triangle  $ABC$ . Sinon,  $M$  suppose qu'il réside à l'extérieur de ce triangle.

En pratique, cependant, cette approximation ne permet pas de réaliser correctement le test PIT. Néanmoins, l'APIT offre un nouveau point de vue pour effectuer une localisation basée sur l'estimation de la zone [33].

### II.4.3 L'algorithme SeRLoc

L'algorithme SeRLoc est une approche basée sur la zone. Suivant l'idée de l'APIT, cette méthode de localisation obtient également la position du nœud en calculant le centre de gravité d'une région de recouvrement. Dans ce cas, cet algorithme suppose un réseau avec des ancres équipés d'antennes directionnelles sectorisées et des nœuds non localisés équipés d'antennes omnidirectionnelles.

L'algorithme comporte quatre étapes :

1. D'abord, les ancres émettent des balises directionnelles dans un secteur. Les nœuds non localisés recueillent ces informations et déterminent la zone de recherche ou le secteur dans lequel ils pensent se trouver.
2. Ensuite, la région de chevauchement des secteurs est calculée.
3. Enfin, la position est obtenue en calculant le centre de gravité de la section de chevauchement obtenue à l'étape précédente. La figure II.16 illustre la procédure.



Figure II.16: Estimation de SeRLoc [32]

Une comparaison en termes de précision de localisation par rapport au nombre moyen d'ancrages entendus est présentée dans [57]. Le meilleur résultat est obtenu avec l'algorithme SeRLoc en comparaison avec d'autres méthodes telles qu'APIT ou DV-HOP. Plus concrètement, l'erreur est égale à 0,5 fois la portée radio  $R$ . D'autre part, l'algorithme SeRLoc obtient également de bons résultats en termes de nombre de transmissions nécessaires. Cependant, SeRLoc obtient le meilleur compromis en termes de précision par rapport aux transmissions nécessaires.

L'inconvénient de cet algorithme est la nécessité d'avoir des ancres équipées d'antennes directionnelles sectorielles [32].

#### II.4.4 L'algorithme MDS

L'algorithme MDS utilise une technique de positionnement centralisé. L'idée est de collecter des informations à partir du réseau par un périphérique central puissant (par exemple, une station de base) et détermine l'emplacement du nœud, puis il diffuse ces informations dans le réseau [58]. Bien qu'il existe de nombreuses variantes de MDS, la version la plus simple (appelée MDS classique) propose des solutions analytiques pour une mise en œuvre efficace. Définissons la matrice carrée de la distance entre les nœuds comme suit :

$$D^2 = c1' + 1c' - SS' \quad (\text{II.37})$$

Où :

$1$  : Un vecteur de longueur  $n \times 1$  où tous les éléments sont égaux à 1.

$S$  : La matrice de similarité pour les  $n$  points, où chaque ligne représente les coordonnées du point  $i$  le long des coordonnées  $m$  ( $m < n$  qui sont des nœuds ancrés et qui connaissent leurs emplacements).

$SS$  : matrice du produit scalaire.

$c$  : Un vecteur contenant les éléments diagonaux de la matrice du produit scalaire.

En multipliant les deux côtés de l'équation par la matrice de centrage  $T = I - \frac{[11]'}{n}$ , où  $I$  est la matrice identité on obtient :

$$TD^2T = T(c1' + 1c' - SS')T = Tc1'T + T1c'T - T(2B)T \quad (\text{II.38})$$

L'utilisation d'une matrice de centrage des uns rend à un vecteur de zéros, et par conséquent :

$$TD^2T = -T(2B)T \quad (\text{II.39})$$

Par multiplication des deux côtés avec  $(-\frac{1}{2})$ , on obtient :

$$B = -1/2TD^2T \quad (\text{II.40})$$

Par conséquent, nous pouvons décomposer  $B$  (car  $c'$  est une matrice symétrique) en :

$$B = Q\Lambda Q' = (Q'\Lambda^{\frac{1}{2}})'(Q'\Lambda^{\frac{1}{2}})' = SS' \quad (\text{II.41})$$

Les coordonnées  $S$  peuvent être calculées par décomposition d'une matrice en éléments propres ("Eigendecomposition") :

$$S = Q\Lambda^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.42})$$

Basé sur ce concept, une méthode de localisation pour les réseaux de capteurs appelée MDS-MAP [58] peut être appliquée [39].

## II.5 Étude comparative des approches de mesure physique

Cette partie présente un aperçu des estimations en termes de précision, de coût du matériel des différentes approches de mesure physique.



Tableau II.1: Étude comparative des mesures physiques [33]

Mesures physiques		Précision	Coût du matériel	Coût du calcul
Distance	RSS	Médiane	Faible	Faible
	ToA	Haut	Haut	Faible
Angle	AoA	Haut	Haut	Faible
Zone	Référence unique	Médiane*	Médiane*	Médiane
	Multi-référence	Médiane*	Médiane*	Haut
Nombre de sauts	Distance par saut	Médiane	Faible	Médiane
Voisinage	Voisin unique	Faible	Faible	Faible
	Multi-voisins	Faible	Faible	Faible

\*Dépend des diverses contraintes géométriques

Dans ce chapitre on a vu les algorithmes « range-based » et « range-free » qui sont utilisés pour la localisation dans les RCSFs et les techniques de positionnement de ces algorithmes. Dans le chapitre suivant, on va étudier quelques algorithmes de localisation et on va proposer une solution pour améliorer leurs performances.

# Chapitre III

Localisation basée sur RSS  
dans les RCSFs à l'aide  
de l'algorithme GM-SDP-2

## III.1 Introduction

La localisation des sources sans fil a attiré des attentions réfléchies au cours des dernières décennies. Parmi les différentes méthodes de localisation, la localisation basée sur l'énergie par l'intermédiaire de la force du signal reçu (RSS) permet une mise en œuvre simple par rapport à d'autres technologies conventionnelles telles que l'heure d'arrivée (TOA), le décalage horaire d'arrivée (TDOA), et l'angle d'arrivée (AOA). Les progrès récents ont rendu pratique la localisation basée sur l'énergie dans divers réseaux, y compris les RCSFs, le réseau sans fil local (WLAN) [59], et les réseaux ad hoc véhiculaires (VANE Ts). Néanmoins, la localisation basée sur le RSS pour atteindre l'estimateur ML des coordonnées des nœuds cibles conduit à un problème d'optimisation non linéaire et non convexe [60]. Plusieurs méthodes ont été proposées pour régler ce problème. Dans ce chapitre, on va étudier des algorithmes tel que WLS et GM-SDP-2 pour estimer l'emplacement des nœuds capteurs et la puissance de transmission et on va proposer une amélioration pour diminuer le taux d'erreur de ces algorithmes.

## III.2 Matériels

### III.2.1 Logiciel Matlab

MATLAB est une plateforme de calcul numérique et de programmation utilisée par des millions d'ingénieurs et des scientifiques pour analyser des données, développer des algorithmes et créer des modèles [61].

### III.2.2 CVX

C'est un système de modélisation basé sur Matlab pour l'optimisation convexe. CVX transforme Matlab en un langage de modélisation, permettant de spécifier les contraintes et les objectifs à l'aide de la syntaxe d'expression standard de Matlab. Dans son mode par défaut, CVX supporte une approche particulière de l'optimisation convexe que nous appelons la programmation convexe disciplinée. Dans cette approche, les fonctions et ensembles convexes sont construits à partir d'un petit ensemble de règles issues de l'analyse convexe, en partant d'une bibliothèque de base de fonctions et ensembles convexes. Les contraintes et les objectifs exprimés à l'aide de ces règles sont automatiquement transformés en une forme canonique et résolus [62].

## III.3 Algorithmes étudiés

Dénotons les coordonnées inconnues du nœud cible  $j$ -ième comme  $\varphi_j = [\varphi_{j1}; \varphi_{j2}]^T$  ( $\varphi_j \in \mathbb{R}^2, j = 1; \dots; M$ ) et les coordonnées connues du nœud d'ancrage  $i$ -ième comme  $\alpha_i = [\alpha_{i1}; \alpha_{i2}]^T$  ( $\alpha_i \in \mathbb{R}^2, j = 1; \dots; N$ ), où  $M$  et  $N$  sont respectivement le nombre total des cibles et d'ancres.

### III.3.1 Calcul de la puissance reçue

De [63] et [64], la puissance reçue à la cible  $j$ -ième de l'ancrage  $i$ -ième (ou vice versa) est généralement modélisée comme [60] :

$$P_{i,j} = P_0 - 10 \beta \log_{10} \frac{d(\varphi_j, \alpha_i)}{d_0} + n_{i,j} \quad (\text{III.1})$$

Où :

$P_0$ : La puissance transmise à la distance  $d_0$ .

$d_0$ : La distance de référence du récepteur.

$d(\varphi_j, \alpha_i)$ : La distance euclidienne entre la cible  $j$ -ième et le nœud d'ancrage  $i$ -ième.

$$d(\varphi_j, \alpha_i) = \|\varphi_j - \alpha_i\|_2$$

$\beta$ : L'exposant de perte de chemin avec la valeur commune entre 2 et 6.

$n_{i,j}$ : Le bruit additif suivant la distribution gaussienne représente l'effet d'observation log-normal dans les environnements multipathiques.

### III.3.2 Algorithme GM-SDP-2

C'est un algorithme amélioré de localisation des nœuds basés sur le RSS, appelé estimateur par programmation semi-définie à mélange gaussien (GM-SDP), créé pour atteindre l'estimation ML des positions des nœuds dans les RCSFs [60].

#### III.3.2.1 Estimation de la position

L'objectif de la conception de l'algorithme de localisation GM-SDP-2 est d'obtenir l'estimation ML du nœud cible  $\varphi_j^*$  en trouvant le paramètre  $\tau_{i,s}$ .

Pour éviter le problème de convexité et de la linéarité on utilise la relaxation semi-définie pour C6 (contrainte d'inégalité  $\psi \geq \varphi_j \varphi_j^T$ ), l'inégalité de Jensen pour C8 ( $y_i = \sum_{s=1}^S \tau_{i,s} \xi_{i,s} \geq \sum_{s=1}^S \xi_{i,s}$ ) et le complément Schur pour C5 et C6 [60].

L'estimateur ML peut être formulé comme [60] :

$$\min_{\varphi_j, \tau, \xi} \|x\|_1 \|y\|_1 \quad (\text{III.2})$$

S.t.

$$\begin{aligned}
C1 : & \sum_{s=1}^S \tau_{i,s} = 1, \quad \forall i \\
C2 : & 0 \leq \tau_{i,s} \leq 1, \quad \forall s, i \\
C3 : & d(\varphi_j, \alpha_i) \neq 0, \quad \forall i \\
C4 : & Tr(\psi) - 2\varphi_j^T \alpha_i + \|\alpha_i\|_2^2 \leq \gamma_{i,s}^2 \sigma_s \xi_{i,s} \\
C5 : & \begin{bmatrix} [Tr(\psi)] - 2\varphi_j^T \alpha_i + \|\alpha_i\|_2^2 & \gamma_{i,s} / \sqrt{\sigma_s} \\ \gamma_{i,s} / \sqrt{\sigma_s} & \xi_{i,s} \end{bmatrix} \geq 0, \forall i, s \\
C6 : & \begin{bmatrix} \psi & \varphi_j \\ \varphi_j^T & 1 \end{bmatrix} \geq 0, \psi \in \mathbb{S}^2 \\
C7 : & x_i \geq Tr(\tau_i \eta^T) \\
C8 : & y_i \geq \sum_{s=1}^S \xi_{i,s}, \forall i, s
\end{aligned} \tag{III.3}$$

Où :

$$\begin{aligned}
\gamma_{i,s}^2 &= d_0^2 10^{\frac{P_0 + \mu_s - P_{i,j}}{5\beta}} \\
\tau_i &= [\tau_{i,1}, \dots, \tau_{i,S}]^T \\
\eta &= [\ln\sqrt{2\pi}\sigma_1, \dots, \ln\sqrt{2\pi}\sigma_s]^T \\
\xi_i &= [\xi_{i,1}, \dots, \xi_{i,S}]^T \\
\max \left[ \frac{d^2(\varphi_j, \alpha_i)}{\sigma_s \gamma_{i,s}^2}, \frac{\gamma_{i,s}^2}{\sigma_s d^2(\varphi_j, \alpha_i)} \right] &\triangleq \xi_{i,s} \text{ (Norme Chebyshev)}
\end{aligned}$$

Notant que :

$$\|\varphi_j - \alpha_i\|_2^2 = Tr(\psi) - 2\varphi_j^T \alpha_i + \|\alpha_i\|_2^2$$

Maintenant le problème d'optimisation convexe peut être résolu par les outils numériques existants [65] pour obtenir la solution globalement optimale  $\varphi_j^*$ .

Dans MATLAB, On utilise le CVX [62] pour simuler cette estimation.

### III.3.2.2 Technique de positionnement par GM-SDP-2

L'objectif de cet algorithme est de calculer la position des nœuds à partir de la puissance reçue (partie calcul de la puissance) et de l'estimation ML (partie Estimation de la position) pour estimer la position des nœuds ( $\hat{\varphi}$ ).

Son RMSE est définie par :

$$RMSE(e) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M \|\varphi_j - \hat{\varphi}_j\|^2}{M}} \tag{III.4}$$

### III.3.3 Cramer-rao lower bound

CRLB est une limite inférieure de la variance de tous les estimateurs impartiaux. Il est bien connu que la limite inférieure cramer-rao (CRLB) qui est l'inverse de la matrice d'information Fisher (FIM), où l'élément  $[J]_{v,r}$  de FIM  $J$  est défini par [60] :

$$[J]_{y,\gamma} = \mathbb{E} \left[ \frac{\partial \ln(P_j|\varphi_j)}{\partial \varphi_{j,v}} \cdot \frac{\partial \ln(P_j|\varphi_j)}{\partial \varphi_{j,r}} \right], v, r \in \mathcal{V} \quad (\text{III.5})$$

$\mathcal{V}$ : L'ensemble des dimensions dans l'axe de coordonnées.

Pour un nœud cible spécifique dans notre scénario bidimensionnel ( $|\mathcal{V}| = 2$ ), nous avons :

$$[J]_{v,r} = \left[ \frac{10\beta}{\ln 10} \right]^2 I_n \sum_{i=1}^N \frac{(\varphi_{j,v} - \alpha_{i,v})(\varphi_{j,r} - \alpha_{i,r})}{\|\phi_j - \alpha_i\|_2^4}, v, r \in \mathcal{V} \quad (\text{III.6})$$

Où :

$$I_n = \mathbb{E} \left\{ \left[ \frac{\nabla_n p(n)}{p(n)} \right]^2 \right\} = \int \frac{[\nabla_n p(n)]^2}{p(n)} dn \quad (\text{III.7})$$

Où :

$$p(n) \sim \sum_{s=1}^S \tau_s \mathcal{N}(\mu_s, \sigma_s^2) \quad (\text{III.8})$$

On peut évaluer numériquement  $I_n$  par intégration monte Carlo [66].

L'erreur d'estimation de localisation est définie par :

$$e = \|\hat{\varphi} - \varphi\| \quad (\text{III.9})$$

Son RMSE inférieure est délimitée par [67] :

$$\sqrt{\mathbb{E}(e^2)} \geq \sqrt{\text{Tr}[J^{-1}]} \triangleq \mathbf{CRLB}(\varphi) \quad (\text{III.10})$$

### III.3.4 Algorithme WLS

L'algorithme des moindres carrés pondérés, également connus sous le nom de régression linéaire pondérée [68] [69], est une technique de localisation peu complexe qui doit sa haute précision à la capacité de compléter et d'approximer les échantillons de la EDM construite à partir d'informations incomplètes et perturbées par des erreurs, recueillies par les capteurs [70].

#### III.3.4.1 Technique de positionnement par WLS

Après le calcul de la puissance reçue (Partie 1), on peut estimer la distance  $d$  comme :

$$d(\varphi_j, \alpha_i) = d_0 \times 10^{\frac{P_0 - P_{i,j}}{10\beta}} \quad (\text{III.11})$$

On va recentrer l'origine sur le premier emplacement d'ancrage pour construire les matrices  $H$  et  $b$  :

$$H = 2 \times \begin{bmatrix} \alpha_{2,1} - \alpha_{1,1} & \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \\ \alpha_{3,1} - \alpha_{1,1} & \alpha_{3,2} - \alpha_{1,2} \\ \vdots & \vdots \\ \alpha_{N,1} - \alpha_{1,1} & \alpha_{N,2} - \alpha_{1,2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

$$b = \begin{bmatrix} (\alpha_{2,1} - \alpha_{1,1})^2 + (\alpha_{2,2} - \alpha_{1,2})^2 \\ (\alpha_{3,1} - \alpha_{1,1})^2 + (\alpha_{3,2} - \alpha_{1,2})^2 \\ \vdots \\ (\alpha_{N,1} - \alpha_{1,1})^2 + (\alpha_{N,2} - \alpha_{1,2})^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_2 - d_1 \\ d_3 - d_1 \\ \vdots \\ d_N - d_1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Où :

$d_i$ : La distance estimée entre le nœud cible et l'ancrage  $i$  depuis le calcul de RSS.

À partir de la variance  $V$ , on obtient la matrice  $S$  :

$$S = \begin{bmatrix} V_2 + V_1 & V_1 & \dots & V_1 \\ V_1 & V_3 + V_1 & \dots & V_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_1 & V_1 & V_1 & V_N + V_1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

Où :

$$Var_{j,i} = \begin{bmatrix} d_{1,1}^2 & d_{2,1}^2 & \dots & d_{N,1}^2 \\ d_{1,2}^2 & d_{2,2}^2 & \dots & d_{N,2}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{1,M}^2 & d_{2,M}^2 & \dots & d_{N,M}^2 \end{bmatrix} \quad \text{et :} \quad V_i = \frac{\sum_{j=1}^M (var_{j,i} - \sum_{j=1}^M \frac{var_{j,i}}{M})^2}{M}$$

La solution WLS est formulée comme suit :

$$\hat{\varphi} = (H^T \times S^{-1} \times H)^{-1} \times H^T \times S^{-1} \times b \quad (\text{III.15})$$

Son RMSE est définie par :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M \|\varphi_j - \hat{\varphi}_j\|^2}{M}} \quad (\text{III.16})$$

## III.4 ANALYSE DES RESULTATS

### III.4.1 Influence d'un nombre d'ancres

Des simulations numériques sont réalisées pour évaluer les performances des algorithmes étudiés. Nous considérons une région carrée bidimensionnelle de la taille de  $15 \times 15 m^2$  pour les simulations. Dans le réseau, 100 capteurs sont déployés aléatoirement plus des ancres variant de 4 à 20 positionnées d'une manière déterministe.

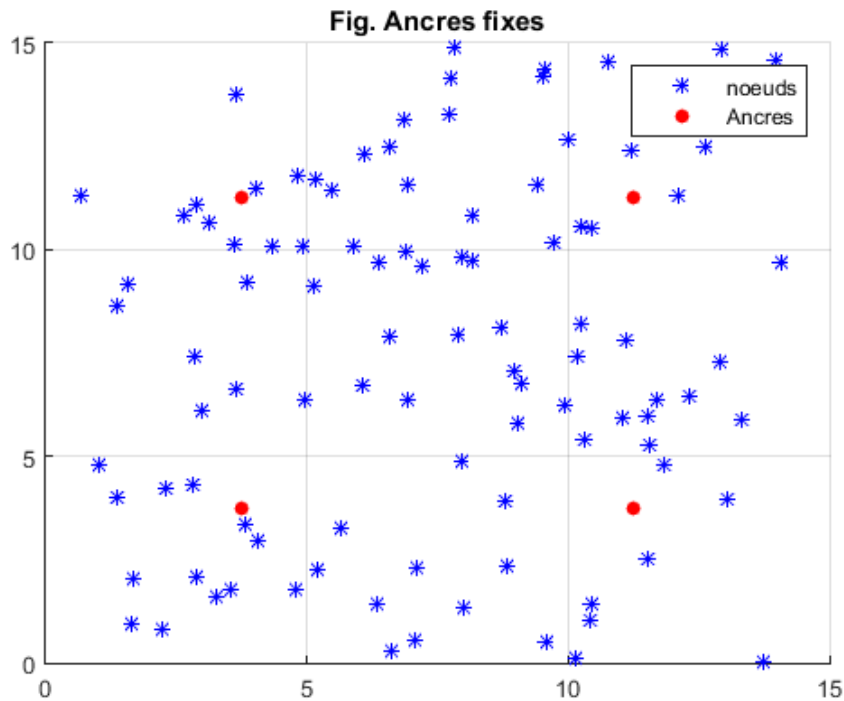


Figure III.1: Positionnement des capteurs sous MATLAB dans le cas de 4 ancres

En raison de la limite d'espace, la stratégie détaillée pour la sélection des ancres est omise. Le bruit est supposé suivre une distribution de mélange gaussien à deux modes avec

$$\tau_1 = 0.37, \mu_1 = -4.36 \text{ dBm}, \sigma_1 = 5.22 \text{ dBm},$$

$$\tau_2 = 0.63, \mu_2 = 1.73 \text{ dBm}, \sigma_2 = 4.09 \text{ dBm}.$$

En l'espèce, le réglage de la moyenne et de la variance de chaque composant du mélange est un exemple des mesures réalistes du bruit à l'intérieur mentionnées dans la section.

- La performance est évaluée en termes de RMSE à l'aide de 100 courses de Monte Carlo avec un nombre d'ancres variant de 4 à 20.



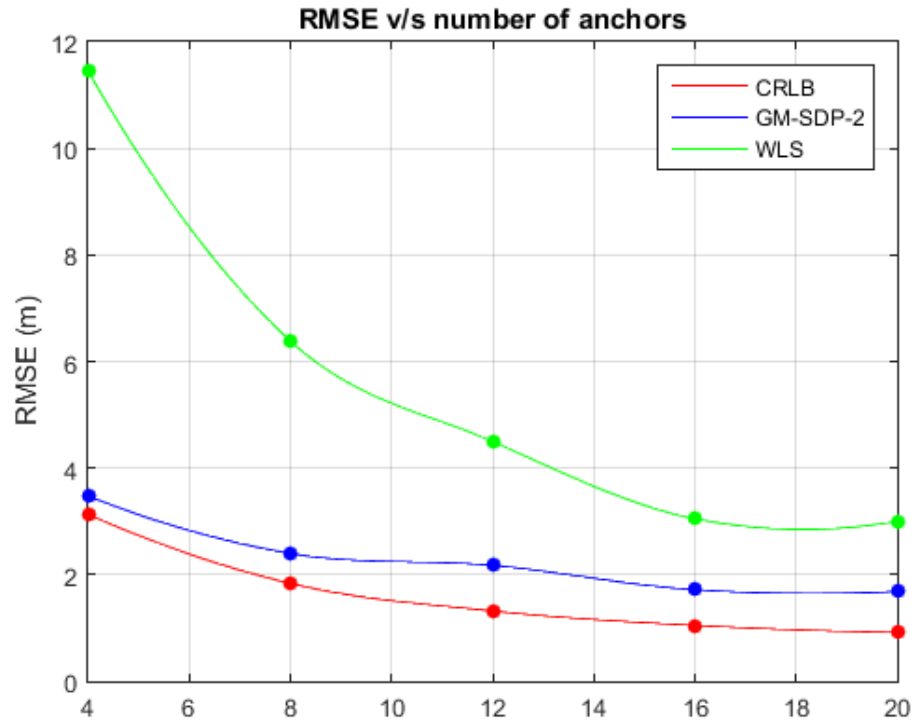


Figure III.2: RMSE par rapport au nombre d'ancres.

La figure III.2 illustre le RMSE par rapport au nombre d'ancres pour divers estimateurs, y compris WLS et GM-SDP-2. La valeur CRLB est également illustrée dans la figure III.2 à titre de comparaison. Il montre que l'augmentation du nombre d'ancres améliore généralement la précision de l'estimation de tous les algorithmes, révélant que plus d'ancres augmenteront la dimension ainsi que faciliteront la détermination précise des mesures RSS.

### III.4.2 Évaluation basée sur CDF

La fonction de répartition (CDF) calcule la probabilité cumulée d'une valeur de  $x$  donnée. L'utilisation de la CDF pour déterminer la probabilité qu'une observation aléatoire extraite de la population est inférieure ou égale à une certaine valeur. On peut également utiliser cette fonction pour déterminer la probabilité qu'une observation soit supérieure à une certaine valeur, ou comprise entre deux valeurs [71].

On utilise la CDF ici pour faire une comparaison entre les probabilités d'erreur entre les différentes estimations en fonction de la portée.

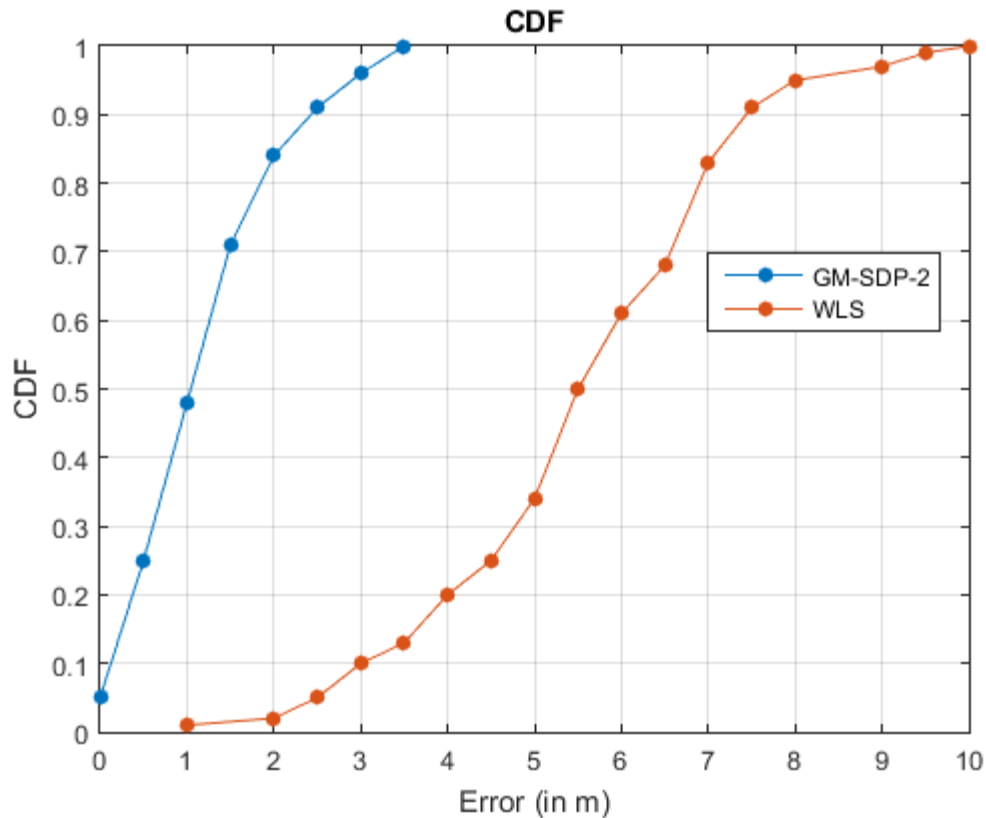


Figure III.3: CDF des erreurs de localisation pour les deux algorithmes.

Les performances des algorithmes étudiées sont encore évaluées par une expérience des mesures CDF. La figure III.3 illustre la CDF des erreurs d'estimation de localisation de divers algorithmes avec un maximum de 120 capteurs (dont 20 ancres). Elle montre que les performances de l'estimateur GM-SDP-2 fonctionnent mieux que WLS, même plus de 84% de ses erreurs d'estimation de localisation sont dans une très courte portée de 2 m par contre l'algorithme WLS atteint la même valeur après une portée de 7,06 m.

## III.5 Algorithme proposé

Dans cette section, nous décrivons notre solution pour améliorer les résultats de la partie simulation précédente.

### III.5.1 Fuzzy C-Means (FCM)

C'est une technique de clustering de données dans laquelle chaque point de données appartient à un cluster à un certain degré qui est spécifié par un degré d'appartenance. Cette technique a été introduite à l'origine par Jim Bezdek en 1981 [72] comme une amélioration des méthodes de clustering précédentes. Elle fournit une méthode qui montre comment regrouper

les points de données qui peuplent un espace multidimensionnel dans un nombre spécifique de clusters différents [73].

La méthode FCM est basée sur la minimisation de la fonction objective suivante [74] :

$$J_m = \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^N \mu_{i,j}^m \|x_i - c_j\|^2 \quad (\text{III.17})$$

Où :

$D$ : Le nombre de points de données.

$N$ : Le nombre de clusters.

$m$ : L'exposant de la matrice de partition floue pour contrôler le degré de chevauchement flou, avec  $m > 1$ . Le chevauchement flou fait référence au degré de flou des frontières entre les clusters, c'est-à-dire au nombre de points de données qui ont une appartenance significative à plus d'un cluster.

$x_i$  : Le  $i$ -ième point de données.

$c_j$ : Le centre de la  $j$ -ième grappe.

$\mu_{i,j}$ : Le degré d'appartenance de  $x_i$  au  $j$ -ième cluster. Pour un point de données donné  $x_i$ , la somme des valeurs d'appartenance de tous les clusters est égale à un.

## III.5.2 Résultats de simulation

Pour évaluer les performances de l'amélioration des algorithmes étudiées, on a fait des simulations par MATLAB. L'objectif de cette amélioration est de placer les nœuds d'ancrage avec la méthode de clustering FCM.

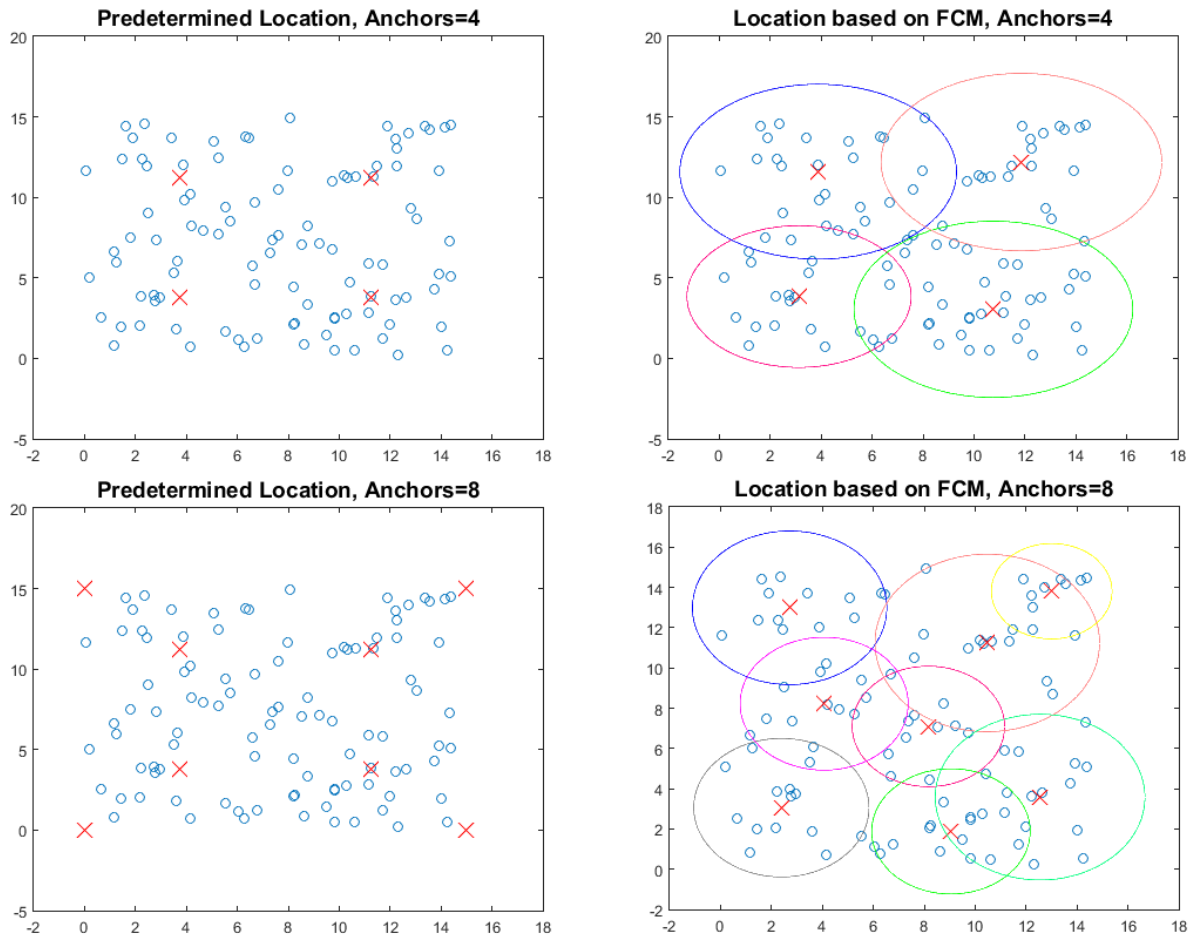


Figure III.4: Positionnement des capteurs avec et sans clustering dans les cas de 4 et 8 ancres

- La performance de cette amélioration est évaluée en termes des métriques RMSE et CDF dans un environnement contenant 100 nœuds déployés aléatoirement avec un nombre d'ancres variant de 4 à 20 placés par la méthode de clustering Fuzzy C-Means.

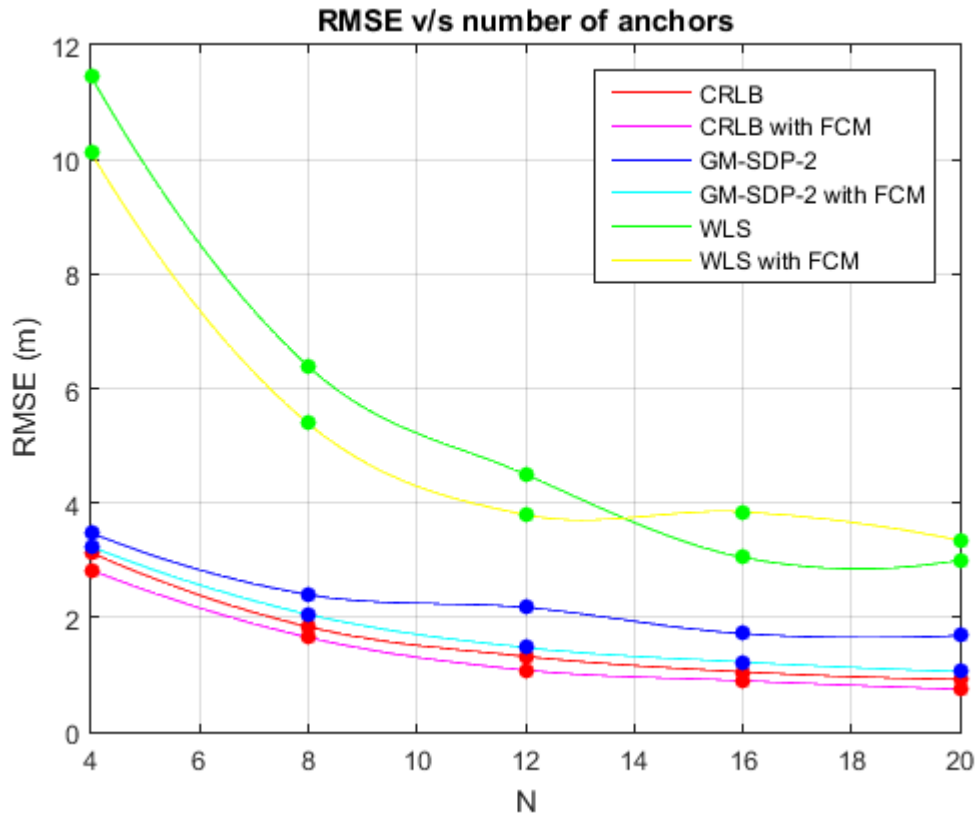


Figure III.5 : Comparaison de RMSE par rapport au nombre d'ancres avant et après le clustering.

La figure III.5 illustre une comparaison des RMSE par rapport au nombre d'ancres pour divers estimateurs entre le positionnement simple et le positionnement avec le FCM clustering des ancres.

Les performances de l'algorithme GM-SDP-2 ont été améliorées pour tous les cas de nombres d'ancres. Pour WLS, on observe une efficacité de clustering des ancres sur les performances au niveau des cas 4, 8 et 12. Par contre, la performance diminue lorsque le nombre d'ancres augmente au-delà de 16.

Tableau III.1: Comparaison entre les résultats des RMSE après le clustering des ancrs et les résultats de positionnement fixe en fonction de nombre d'ancres.

Nombre d'ancres		4	8	12	16	20	Amélioration
RMSE (m)	<b>WLS</b>	11,448	6,387	4,498	3,048	3,002	6,7%
	<b>WLS avec FCM</b>	10,112 ↓	5,389 ↓	3,792 ↓	3,842 ↑	3,344 ↑	
	<b>GM-SDP-2</b>	3,475	2,397	2,172	1,716	1,683	21,08%
	<b>GM-SDP-2 avec FCM</b>	3,234 ↓	2,051 ↓	1,473 ↓	1,22 ↓	1,053 ↓	
	<b>CRLB</b>	3,132	1,835	1,317	1,048	0,915	12,78%
	<b>CRLB avec FCM</b>	2,829 ↓	1,65 ↓	1,078 ↓	0,893 ↓	0,743 ↓	

### III.5.3 Evaluation basée sur CDF

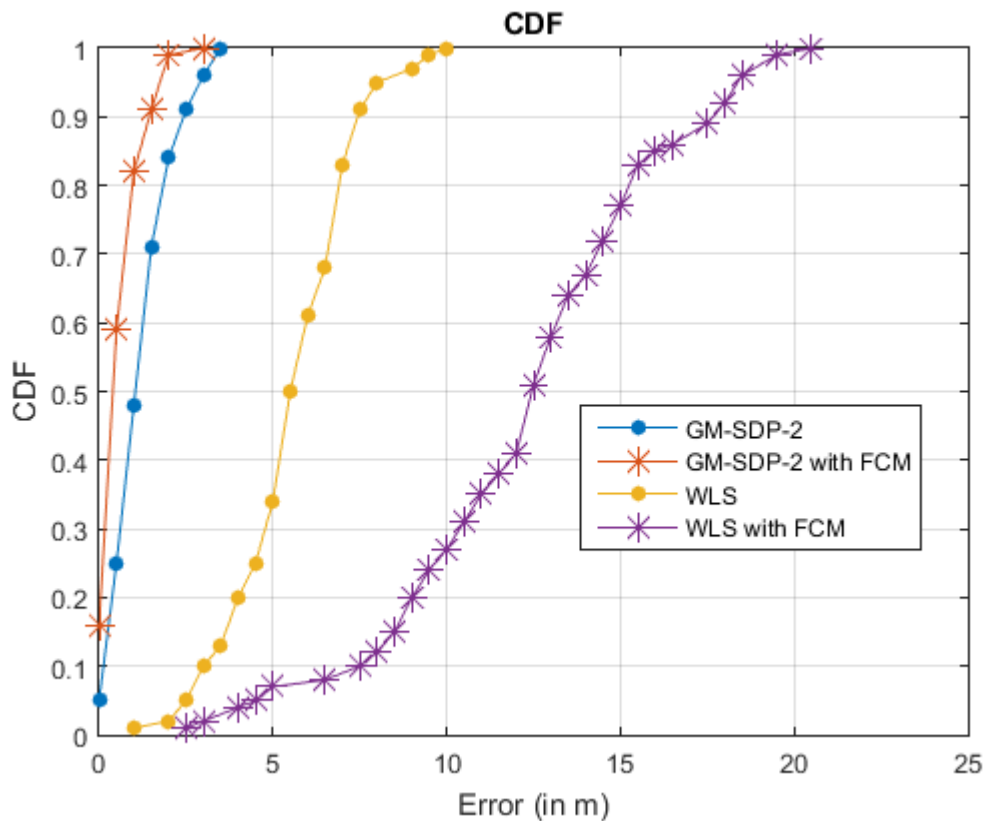


Figure III.6 : Comparaison des CDF des erreurs de localisation pour les deux algorithmes avec et sans clustering.

Les performances des algorithmes étudiés avec un clustering des ancrs sont encore évaluées par une expérience des mesures CDF. La figure III.6 illustre le CDF des erreurs

d'estimation de localisation de divers algorithmes avec un maximum de 120 capteurs (dont 20 ancrés) avec un positionnement fixe d'ancres et un positionnement avec clustering. Cette figure montre que les performances de l'estimateur GM-SDP-2 ont été améliorées avec le clustering des ancrés. Avec le clustering, le GM-SDP-2 atteint 99% de ses erreurs pour une portée de 2m alors qu'il atteint 84% avec le positionnement fixe des ancrés.

Tableau III.2 : CDF en fonction de la portée pour GM-SDP-2

Portée (m)		<b>1</b>	<b>1,5</b>	<b>2</b>	<b>2,5</b>	<b>3</b>
CDF	<b>GM-SDP-2</b>	48%	71%	84%	91%	96%
	<b>GM-SDP-2 avec FCM</b>	82%	91%	99%	99,5%	100%

Contrairement, la CDF des erreurs d'estimation de l'algorithme WLS montre une diminution totale des performances telles que l'erreur pour atteindre un CDF de 100% varie de 10 à 20,5 m respectivement pour le WLS et le WLS avec clustering.

# Conclusion générale

Le réseau de capteurs se compose d'un grand nombre de dispositifs de communication ultra petits et autonomes avec des ressources informatiques et énergétiques limitées. En raison de leur utilisation dans différents domaines d'application, ils sont actuellement considérés comme l'une des technologies qui changent notre mode de vie.

Cependant, les réseaux de capteurs sans fil rencontreront des problèmes qui affectent leur fonctionnement normal en raison de leurs caractéristiques, de sorte qu'ils ne peuvent pas reconnaître clairement leur position. Afin de résoudre ce problème, des études ont été faites pour trouver des algorithmes qui peuvent réaliser l'estimation précise des nœuds dans un RCSF.

Dans ce mémoire, nous avons proposé une amélioration d'un algorithme de localisation dans les RCSFs basée sur RSS nommé GM-SDP-2. Cet algorithme a été simulé sous MATLAB à l'aide de système de modélisation CVX.

Nous avons présenté l'algorithme GM-SDP-2 avec des simulations numériques réalisées pour évaluer ses performances en se basant sur RSS. Cet algorithme a été créé pour atteindre l'estimation ML à l'aide de plusieurs contraintes. L'utilisation de système de modélisation CVX est nécessaire pour obtenir les résultats avec l'estimateur ML sous MATLAB. On a comparé les résultats obtenus des RMSE et d'évaluation basée sur CDF avec les résultats d'autres algorithmes. GM-SDP-2 est plus performant au niveau des RMSE et d'évaluation basée sur CDF, et la performance de cet algorithme est plus efficace lors de l'ajout d'autres ancres.

Pour l'algorithme GM-SDP-2 amélioré, on a proposé une modification sur l'emplacement des ancres avec un clustering FCM. Cette méthode de clustering donne un meilleur positionnement des nœuds d'ancrage.

Les résultats obtenus par la comparaison entre ces deux algorithmes, montrent l'efficacité du protocole GM-SDP-2 amélioré proposé pour les RCSFs, qui peut assurer une meilleure précision au niveau d'estimation de la position des nœuds dans un réseau avec une amélioration de 21.08% au niveau des RMSE et une meilleure performance pour l'évaluation basée sur CDF.



Enfin, dans une perspective, nous prévoyons d'implémenter l'algorithme de localisation GM-SDP-2 amélioré sur des capteurs réels et de développer une solution d'estimation de position adaptée au RCSF.

# Bibliographie

- [1] M. C. V. Dr Ian F. Akyildiz. Wireless Sensor Networks. John Wiley and Sons, 2010.
- [2] Dargie W., Poellabauer C. (2010). Fundamentals of wireless sensor networks: Theory and practice. Wiley.
- [3] univ-mlv, <http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/Bunel/Presentation.html>, consulté le : 13/06/2021.
- [4] Y. Younes. Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs. Master's thesis, Université Mouloud Mammen de Tzi-Ouzou, Septembre 2012.
- [5] omega.ca, <https://www.omega.ca/fr/resources/senseurs-sans-fil>, consulté 13/06/2021.
- [6] Wilson J. S. (2004). Sensor technology handbook. Amsterdam, Elsevier.
- [7] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. I. Cayirci. "A survey on sensor networks". IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 8, pp. 102116, August 2002.
- [8] Equipe de Get 2005 Capt'Adhoc. "Sensor network s: State of the art". Technical Report, Telecom Paris, ENST Br, INT, INRIA, Mars 2006.
- [9] Q. Zhao and L. Tong. "Distributed opportunistic transmission for wireless sensor networks". Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2004), may 2004.
- [10] WILSON, Jon S. Sensor technology handbook. Elsevier, 2004.
- [11] David Martins, "Sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil Stéganographie et réseaux de confiance", L'U.F.R. des Sciences et Techniques de l'université de Franche-Comté, 2010.
- [12] ubc, [http://courses.ece.ubc.ca/494/files/MICAz\\_Datasheet.pdf](http://courses.ece.ubc.ca/494/files/MICAz_Datasheet.pdf), consulté le : 13/06/2021.
- [13] Y. Sankarasubramaniam I.F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci. A survey on sensor networks. IEEE Com-munications Magazine, 40 :102–114, Aug. 2002.
- [14] W. B. Heinzelman. Application-specific protocol architectures for wireless networks. PhD thesis, Massa-chusetts Institute of Technology, May 2000.
- [15] Chee-Yee Chong and S P Kumar. Sensor networks : evolution, opportunities, and challenges. Proceedings of the IEEE, 91 :1247âAS1256,, Aug. 2003.
- [16] C.L. Ham D.A. Knapp Z.M. Koenig S.J. Luke T.B. Gosnell, J.M. Hall. Gamma-ray identification of nuclear weapon materials. Technical report, Lawrence Livermore National Lab, Livermore,CA (USA), 1997.
- [17] Aline Baggio. Wireless sensor networks in precision agriculture. In Real-World Wireless Sensor Networks, Sweden, 2005.
- [18] McCarthy P. Guru S. M. Peng W. Hugo D. McCulloch, J. and Terhorst. Wireless sensor network deploy-ment for water use efficiency in irrigation. In Real-World Wireless Sensor Networks, Scotland, 2008.
- [19] PANCHARD, Jacques, PRABHAKAR, T. V., HUBAUX, Jean-Pierre, *et al.* Commonsense net: A wireless sensor network for resource-poor agriculture in the semiarid areas of developing countries. *Information Technologies & International Development*, 2007, vol. 4, no 1, p. pp. 51-67.

- [20] Soto F. Suardiaz J. Sanchez P. Iborra A. Lopez Riquelme, J. A. and J. A Vera. Wireless sensor networks for precision horticulture in southern Spain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1) :25–35, 2009
- [21] utc, <https://www.utc.fr/recherche/les-unites-de-recherche-de-lutc/heuristique-et-diagnostic-des-systemes-complexes-heudiasyc-umr-cnrs-7253/#zoom-sur-deux-projets>, consulté le : 25/06/2021.
- [22] Philippe Hunel Harry Gros-Desormeaux Nathalie Dessart, Hac'ene Fouchal and Nicolas Vidot. Distributed decision for medical alerts using wireless sensors. *IEEE World Of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WOWMOM)*, pages 1–6, 2009.
- [23] I. Bachelet S.M. Douglas and G.M. Church. A logic-gated nanorobot for targeted transport of molecular payloads. *Science journal*, 335 :831–834, 2012.
- [24] technologyreview, <https://www.technologyreview.com/2008/08/04/219438/tracking-a-shoppers-habits/>, consulté le : 25/06/2021.
- [25] PETRIU, Emile M., GEORGANAS, Nicolas D., PETRIU, Dorina C., *et al.* Sensor-based information appliances. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2000, vol. 3, no 4, p. 31-35.
- [26] H. Shen, Z. Ding SD & Zhao C (2014). “Multiple Source Localization in Wireless Sensor Networks Based on Time of Arrival Measurement”. *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 8, pp. 1938-1949.
- [27] J. Rezazadeh, M. Moradi AI & Dutkiewicz E (2014a). “Superior Path Planning Mechanism for Mobile Beacon-Assisted Localization in Wireless Sensor Networks,”. *IEEE Sensors J.*, vol.14, no. 9, pp. 3052-3064.
- [28] MA, Di, ER, Meng Joo, et WANG, Bang. Analysis of hop-count-based source-to-destination distance estimation in wireless sensor networks with applications in localization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, vol. 59, no 6, p. 2998-3011.
- [29] ALMUZAINI, Khalid K., GULLIVER, Aaron, *et al.* Range-based localization in wireless networks using density-based outlier detection. *Wireless Sensor Network*, 2010, vol. 2, no 11, p. 807.
- [30] ZAIDI, Slim, EL ASSAF, Ahmad, AFFES, Sofiene, *et al.* Range-free nodes localization in mobile wireless sensor networks. In : *2015 IEEE international conference on ubiquitous wireless broadband (ICUWB)*. IEEE, 2015. p. 1-6.
- [31] OLAYAN, Hussein. *Conception et implémentation matérielle et évaluation en conditions réelles de techniques avancées de localisation pour les réseaux de capteurs sans fil*. 2020. Thèse de doctorat. Maîtrise en télécommunications.
- [32] BEL I PEREIRA, Albert. *A pragmatic approach of localization and tracking algorithms in wireless sensor networks*. Universitat Autònoma de Barcelona., 2013.
- [33] LIU, Yunhao et YANG, Zheng. Localizability Location-awareness Technology for Wireless Networks. 2010.
- [34] MAO, Guoqiang, FIDAN, Barış, et ANDERSON, Brian DO. Wireless sensor network localization techniques. *Computer networks*, 2007, vol. 51, no 10, p. 2529-2553.
- [35] S.Y. Seidel, T.S. Rappaport, “914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 40, no. 2, pp. 209–217, 1992.
- [36] G. Mao, B. Fidan, B.D.O. Anderson, “Wireless sensor network localization techniques,” *Computer Networks*, vol. 51, pp. 2529–2553, 2007
- [37] P. Bahl, V.N. Padmanabhan, “RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2000
- [38] L.M. Ni, Y. Liu, Y.C. Lau, A. Patil, “LANDMARC: indoor location sensing using active RFID,” *ACM Wireless Networks*, vol. 10, no. 6, 2004

- [39] EL ASSAF, Ahmad. *Low-Cost Localization Algorithms for Wireless Sensor Networks*. 2016. Thèse de doctorat. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.
- [40] A. EL Assaf, S. Zaidi SA & Kandil N (2015). "Cost-Effective and Accurate Nodes Localization in Heterogeneous Wireless Sensor Networks". *Proc. IEEE ICC'2015, London, United Kingdom*.
- [41] PATWARI, Neal, ASH, Joshua N., KYPEROUNTAS, Spyros, *et al.* Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks. *IEEE Signal processing magazine*, 2005, vol. 22, no 4, p. 54-69.
- [42] N.B. Priyantha, A. Miu, H. Balakrishnan, S. Teller, "The cricket compass for context-aware mobile applications," in Proceedings of ACM MobiCom, 2001
- [43] A. Nasipuri, K. Li, "A directionality based location discovery scheme for wireless sensor networks," in Proceedings of WSNA, 2002
- [44] D.J. Torrieri, "Statistical theory of passive location systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-20, no. 2, pp. 183–198, 1984
- [45] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin, "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices," *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 7, no. 5, pp. 28–34, 2000
- [46] Zh. Yang, Y.H. Liu, "Quality of Trilateration: Confidence based Iterative Localization", *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS)*, Vol. 21, No. 5, May2010
- [47] ASMAA, Labyad, HATIM, Kharraz Aroussi, et ABDELAZIZ, Mouloudi. Localization algorithms research in wireless sensor network based on Multilateration and Trilateration techniques. In : *2014 third IEEE international colloquium in information science and technology (CIST)*. IEEE, 2014. p. 415-419.
- [48] J. Rezazadeh, M. Moradi AI & Dutkiewicz E (2014b). "Superior Path Planning Mechanism for Mobile Beacon-Assisted Localization in Wireless Sensor Networks ". *IEEE Sensors J.*, vol.14, no. 9, pp. 3052-3064.
- [49] A. Srinivasan and J. Wu, "A survey on secure localization in wireless sensor networks," *Encyclopedia of Wireless and Mobile Communications*, 2007.
- [50] A. Savvides, C. Han, M.B. Strivastava, "Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors," in Proceedings of ACM MobiCom, 2001
- [51] YU, Wenqi et LI, Hao. An improved DV-Hop localization method in wireless sensor networks. In : *2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*. IEEE, 2012. p. 199-202.
- [52] D. Niculescu and B. Nath, "Ad hoc positioning system (APS)," *Proc. IEEE GLOBECOM' 2001*, San Antonio, TX, USA, November 25-29, 2001.
- [53] Niculescu D, Nath B. DV Based Positioning in Ad hoc Networks. *Journal of Telecommunication Systems*, 2003, 22(1-4): 267-280
- [54] ZHANG, Junguo, LI, Wenbin, CUI, Dongxu, *et al.* Study on improved DV-Hop node localization algorithm in wireless sensor network. In : *2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. IEEE, 2010. p. 1855-1858.
- [55] T. He, C. Huang, B.M. Blum, J.A. Stankovic, T.F. Abdelzaher, "Range-free localization schemes in large scale sensor networks," in Proceedings of ACM MobiCom, 2003
- [56] J.N. Al-Karaki and A.E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks : a survey," *IEEE Wireless Commun.* vol. 11, no. 6, pp. 6-8, December 2004.
- [57] LAZOS, Loukas et POOVENDRAN, Radha. SeRLoc: Secure range-independent localization for wireless sensor networks. In : *Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Wireless Security*. 2004. p. 21-30.

- [58] Y. Shang, W. Rumi, Y. Zhang, M. Fromherz, "Localization from connectivity in sensor networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 15, no. 11, pp. 961-974, November 2004
- [59] W. Y. Hu, J. L. Lu, S. Jiang, W. Shu, and M. Y. Wu, "WiBEST: A hybrid personal indoor positioning system," in Proc. IEEE WCNC, pp. 2149-2154, 2013.
- [60] Zhang, Yueyue, et al. "RSS-based localization in WSNs using Gaussian mixture model via semidefinite relaxation." *IEEE Communications Letters* 21.6 (2017): 1329-1332.
- [61] Mathworks, <https://fr.mathworks.com/products/matlab.html>, consulté le 13/06/2021.
- [62] cvxr, <http://cvxr.com/cvx/>, consulté le : 13/06/2021.
- [63] S. Tomic, M. Beko, and R. Dinis, "RSS-Based Localization in Wireless Sensor Networks Using Convex Relaxation: Noncooperative and Cooperative Schemes," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 5, pp. 2037-2050, May. 2015.
- [64] R.W. Ouyang, A. K. Wong, and C. T. Lea, "Received Signal Strength-Based Wireless Localization via Semidefinite Programming: Noncooperative and Cooperative Schemes," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol 59, no. 3, pp. 1307-1318, Mar. 2010.
- [65] cvxr, <http://cvxr.com/cvx/doc/CVX.pdf> , consulté le : 13/06/2021.
- [66] F. Yin, C. Fritsche, D. Jin, F. Gustafsson, and A. M. Zoubir, "Cooperative Localization in WSNs Using Gaussian Mixture Modeling: Distributed ECM Algorithms, *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 63, no. 6, pp. 1448-1463, Mar. 2015.
- [67] R.W. Ouyang, A. K. Wong, and C. T. Lea, "Received Signal Strength-Based Wireless Localization via Semidefinite Programming: Noncooperative and Cooperative Schemes," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol 59, no. 3, pp. 1307-1318, Mar. 2010.
- [68] Minitab, <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/supporting-topics/basics/weighted-regression/>, consulté le : 13/06/2021.
- [69] sas, <https://blogs.sas.com/content/iml/2016/10/05/weighted-regression.html>, consulté le : 13/06/2021.
- [70] DESTINO, Giuseppe, MACAGNANO, Davide, et ABREU, Giuseppe. A clusterized WLS localization algorithm for large scale WSNs. In : *2007 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*. IEEE, 2007. p. 261-265.
- [71] Minitab, <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/help-and-how-to/probability-distributions-and-random-data/supporting-topics/basics/using-the-cumulative-distribution-function-cdf/>, consulté le : 13/06/2021.
- [72] Bezdec, J.C., *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press, New York, 1981.
- [73] Mathworks, <https://fr.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-clustering.html>, consulté le : 13/06/2021.
- [74] Mathworks, <https://fr.mathworks.com/help/fuzzy/fcm.html>, consulté le : 13/06/2021.