

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique
Université A.Mira de Béjaia
Faculté des Sciences Exactes
Département de Recherche Opérationnelle



Mémoire de Master 2 en Recherche Opérationnelle
Option : Fiabilité et Evaluation de Performance
des Réseaux (F.E.P.R)

Thème

*Estimation Optimale de la Localisation des Noeuds
dans les Réseaux de Capteurs Sans Fils*

Proposé et encadré par :

D^r SEMCHÉDINE Fouzi

M^r KHIMOUME Nouredine

Réalisé par :

M^r GHEDDOUCHE Boubekour

M^r HAOUASSI Seyyed — Ali

Devant le jury composé de :

Présidente : M^{me} TOUCHE (MAA)

Examineur 1 : M^r YAZIDE Mohand (MAA)

Examineur 2 : M^r BRAHMI Belkacem (MCB)

Université de Béjaia, Promotion : 2013/2014

Remerciements

LOUANGE à Allah le tout puissant, seigneur de l'univers, pour ce plaisir et cette chance de pouvoir nous acquitter d'une infime partie de nos redevances, en exprimant toute notre profonde gratitude et nos plus vifs remerciements à M^r le D^r. SEMCHEDINE Fouzi, et M^r. KHIMOUME Nouredine, promoteur, et co-promoteur au Département de Recherche Opérationnelle de l'Université A/Mira de Béjaia, qui ont participé dans la direction de ce modeste travail dans de bonnes conditions et pour nous avoir encadrés, guidés, et soutenus tout au long de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent aux membres du jury, M^{me} TOUCHE Maître Assistante de classe-A (MAA), M^r YAZIDE Mohand Maître Assistant de classe-A (MAA), et M^r BRAHMI Belkacem Maître de Conférences de classe-B (MCB) à l'Université A/Mira de Béjaia pour pouvoir examiner ce présent travail.

Nous souhaitons encore une fois exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont assisté, contribué de près ou de loin avec dévouement et générosité dans l'accomplissement ou dans l'élaboration de ce mémoire, en particulier GHEDDOUCHE Riad, BADOUD Abbas, et GUEDDOUCHE L'Yacine pour leur soutien dans les moments les plus difficiles et pour leur encouragement.

Nous n'oublierions pas de remercier vivement tous les membres de notre famille pour leurs soutiens et leur encouragements, en particulier nos parents qui nous ont toujours encouragés et avoir donnés tout ce qui est beau et bon.

GHEDDOUCHE Boubekkeur.

HAOUASSI Seyyed — Ali.

Dédicace

*J*E dédie ce modeste travail à :

La personne devant laquelle tous les mots de l'univers sont incapables d'exprimer l'affection et l'amour que j'éprouve envers elle, à l'être qui m'est le plus cher, à ma douce mère. Puisse ce mémoire être la récompense de tes soutiens moraux et sacrifices. Mère, si tu savais combien je t'aime.

Mon cher père qui a payé tout sa vie d'amour et de sacrifices, que tu t'es imposé pour assurer mon bien être et mon éducation et le prix de ma façon de penser. Père, je te remercie d'avoir fait de moi un homme.

Mon frère, mes adorables soeurs : Leila, et la petite Nadjat , en particulier Lamia, je te souhaite un mariage heureux et plein de bonheur.

A mes amis qui restent à mes côtés au milieu des temps de sable et en basse mer, en particulier :

- ☛ GHEDDOUCHE Riad ;
- ☛ BADOUD Abbas ;
- ☛ GUEDDOUCHE L'Yacine ;
- ☛ GUEDDOUCHE Abd-rahim ;
- ☛ NACEL Yassin ;
- ☛ CHAALAL Makhlouf ;
- ☛ HACHEMAOUI Yassin ;
- ☛ CHIBA Bilal ;
- ☛ HACHEMAOUI Oubaida ;
- ☛ LEGRIDI Oualid.

Qu'Allah le tout puissant vous protège.

GHEDDOUCHE Boubekeur.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire " Ya Kayoum ".

☛ A ma très chère mère Hayette :

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté, une source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus que ce qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

☛ A mon très chère Père Djelloul :

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jours et nuits pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

☛ A mon très cher frère Mustapha :

Mon cher petit frère présent dans tous mes moments d'examens par son soutien moral et ses belles surprises sucrées. Je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité. Une pensée bien particulière pour toi mon cher frère à cause de ton éloignement, j'aurais tant aimé partager ce moment avec l'une des personnes les plus chères pour moi en qui j'ai un énorme respect. Je t'exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.

☛ A mes très chers grands parents, tentes, oncles et leurs femmes :

Vous avez toujours été présents pour les bons conseils. Votre affection et votre soutien m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie professionnelle et personnelle. Veuillez trouver dans ce modeste travail ma reconnaissance pour tous vos efforts.

☛ A ma très chère fiancée Soraya :

Quand je t'ai connu, j'ai trouvé en toi la femme de ma vie, mon âme soeur et la lumière qui guide mon chemin. Ma vie à tes côtés est remplie de belles surprises. Tes sacrifices, ton soutien moral et matériel, ta gentillesse sans égal, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études. Que dieu réunisse nos chemins pour un long commun serein et que ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.

☛ A nos chères et dynamique professeurs :

Un remerciement particulier et sincère pour tous vos efforts fournis. Vous avez toujours été présents. Que ce travail soit un témoignage de ma gratitude et mon profond respect.

☛ A mes chers amis, camarades, et collègues :

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères, soeurs et des amis sur qui je peux compter.

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

HAOUASSI Seyyed — Ali.

Table des Matières

Table des matières	i
Liste des acronymes	iii
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	4
1.1 Introduction	4
1.2 Définition d'un capteur	5
1.3 Définition d'un capteur intelligent	5
1.4 Les noeuds capteur	6
1.5 Caractéristiques d'un capteur	6
1.6 Architecture physique d'un capteur	7
1.7 Définition d'un réseau de capteurs	9
1.8 Objectif de base des RCSFs	10
1.9 Architecture physique d'un RCSF	10
1.10 Classification des RCSFs	12
1.10.1 Selon le mode d'acquisition et de livraison des données au puits (station de base)	13
1.10.2 Selon la distance entre les noeuds capteurs et le puits (station de base)	13
1.10.3 Selon le modèle de mobilité dans le réseau	13
1.10.4 Selon les capacités des noeuds du réseau	14
1.10.5 Selon la densité des noeuds capteurs	14
1.11 Comparaison entre les RCSFs et les réseaux Ad-hoc classiques	15
1.12 Facteurs et contraintes de conception d'un RCSF	16
1.12.1 Les contraintes conceptuelles	17
1.12.2 Les principaux services des RCSFs	20
1.12.3 Les contraintes matérielles	23
1.13 Domaines d'application des RCSFs	23
1.14 La communication dans les RCSFs	26
1.14.1 Couches de la pile protocolaire pour la communication dans les RCSFs	26
1.14.2 Les standards de communication pour les RCSFs	29
1.14.3 La topologie d'un RCSF	30
1.15 Conclusion	31
2 La localisation dans les réseaux de capteurs sans fils	32
2.1 Introduction	32
2.2 Objectif de la localisation dans les RCSFs	33
2.3 Caractérisations des méthodes de localisation	34

2.3.1	Nécessité de connaître la position d'ancres	34
2.4	Problématique de la localisation dans les RCSFs	34
2.5	Processus de localisation dans les RCSFs	35
2.6	La localisation à l'aide d'une ancre (beacon)	35
2.6.1	La localisation à l'aide des ancres statiques	35
2.6.2	Définition des ancres statiques	36
2.6.3	Mode d'utilisation des ancres statiques	36
2.6.4	La localisation à l'aide d'une seule ancre mobile	37
2.7	Propriétés de localisation dans les RCSFs	37
2.8	Classification des approches de localisation dans les RCSFs	38
2.8.1	L'approche directe	38
2.8.2	L'approche indirecte	39
2.9	Conclusion	39
3	Méthodes d'estimation optimales de la localisation des noeuds dans les RCSFs	40
3.1	Introduction	40
3.2	Méthodes de localisation géométriques dans les RCSFs	41
3.2.1	Méthode de trilatération	42
3.2.2	Méthode de triangulation	43
3.2.3	Méthode de multilatération	45
3.2.4	Méthode des hyperboles	46
3.2.5	Méthode probabiliste	47
3.2.6	Méthode du cadre englobant (Bounding Box)- BB	48
3.2.7	Méthode de position centrale	49
3.3	Bilan et synthèse sur les méthodes de calcul de la position	49
3.4	La localisation dans les réseaux de capteurs statiques	50
3.5	Méthodes de localisation s'appuyant sur des ancres	50
3.5.1	Méthodes de localisation de mesures basées (RANGE-BASED)	50
3.5.2	Méthodes de localisation de mesures libres (RANGE-FREE)	59
3.6	Comparaison des méthodes d'estimation des distances/angles	64
3.7	Les familles de méthodes de localisation qui partagent le même schéma d'exécution	65
3.7.1	Méthode HTRefine	65
3.8	Méthode SumDistMinMax	66
3.9	Méthode APS	68
3.10	Méthode APS _{AoA}	69
3.11	La localisation dans les réseaux mobiles	70
3.12	Forme d'implémentation	71
3.12.1	Les méthodes centralisées	71
3.12.2	Les méthodes distribuées	71
3.12.3	Comparaison entre les méthodes centralisées & distribuées	72
3.13	Les critères des méthodes de localisation dans les RCSFs	72
3.14	Conclusion	74
4	Algorithme de localisation pour les RCSFs	75
4.1	Formulation du problème	75
4.2	Technique de localisation RSSI	77
4.2.1	Modélisation de l'atténuation du signal	77
4.3	Estimation des distances	78
4.3.1	Estimation des distances à partir des liens de communication	78
4.4	Modèle d'estimations des distances général	79
4.5	Erreur du modèle d'estimation des distances	79
	Conclusion générale	86
	Bibliographie	88

Liste des Acronymes

Liste des Acronymes	
L'abréviation	La terminologie exacte
MANET	Mobile Ad-hoc NETwork
WSN	Wireless Sensors Network
RCSFs	Réseaux de Capteur Sans Fils
ADC	Analog to Digital Converter
TinyOS	Tiny Operating-System
RF	Radio Frequency
IF	Infra-Rouge
US	Ultra-Son
GPS	Global Positioning System
LPS	Local Positioning System
ToA	Time of Arrival
TDoA	Time Difference of Arrival
AoA	Angle of Arrival
RSSI	Received Signal Strength Indicator
VOR	VHF Omni-directional Range
GSM	Global system for Mobile communication
K-NN	K-Nearest Neighbor
SVR	Support Vector Regression
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
HTRefine	Hot Top Refine
DV-Hop	Distance Vector-Hop
APS	Ad-hoc Positioning System
APS AoA	Ad-hoc Positioning System Angle of Arrival
RAM	Random Access Memory
ROM	Read- Only Memory
Min	Minimum
Max	Maximum

Introduction générale

DEPUIS quelques décennies, le besoin d'observer et de contrôler des phénomènes physiques tels que la température, la pression ou encore la luminosité est essentiel pour de nombreuses applications industrielles et scientifiques, et même grand public. Par exemple, dans le domaine de l'écologie, la surveillance de polluants comme l'Ozone, le NO_2 ou encore le CO_2 pourrait considérablement augmenter la qualité de vie dans les villes. Cette tâche est déléguée aux capteurs dont la fonction est l'acquisition de l'information sur les phénomènes observés. Il n'y a pas si longtemps, la seule solution pour acheminer les données du capteur jusqu'au contrôleur central était le câblage qui avait comme principaux défauts d'être coûteux et encombrant [1, 2, 3, 4].

En effet, grâce aux récents progrès réalisés ces dernières décennies dans les domaines de la micro-électronique, de la micro-mécanique, et des technologies de communication sans fil, ont permis de produire avec un coût raisonnable des composants de quelques millimètres cubes de volume. Ces derniers, appelés micro-capteurs, intègrent, une unité de captage chargée de capter des grandeurs physiques (chaleur, humidité, vibrations) et de les transformer en grandeurs numériques, une unité de traitement informatique et de stockage de données et un module de transmission sans fil [5].

De ce fait, les micro-capteurs sont de véritables systèmes embarqués, et le déploiement de plusieurs d'entre eux, en vue de collecter, de stocker, de traiter et transmettre les données collectées et de la communiquer à un centre de contrôle via le canal sans fil (station de base), d'une manière autonome. Ainsi il devient facile de déployer les capteurs dans des endroits parfois même difficiles d'accès, pour former un réseau de capteurs sans fil (RCSF), en évitant l'usage des câbles utilisés depuis longtemps. On s'est ainsi affranchi de la contrainte de câblage, qui limitait considérablement le déploiement d'un grand nombre de noeuds. Il est donc devenu tout à fait possible de déployer un réseau constitué d'un grand nombre de capteurs collaboratifs afin de surveiller une zone plus large [6].

Les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks (WSN) en anglais) fournissent une nouvelle perspective par rapport aux réseaux ad-hoc sans fil classique, notamment grâce à leur capacité de s'auto configurer et de se gérer sans qu'il y ait besoin d'interventions humaines avec une grande tolérance aux défaillances. De plus, les critères de performance pour un réseau de capteurs diffèrent de ceux des réseaux classiques et donc les solutions à apporter sont nouvelles .

Les réseaux de capteurs sans fil sont des réseaux spontanés constitués de noeuds déployés en grand nombre en vue de récolter et de transmettre des données vers un ou plusieurs points de collecte, et ce de façon autonome. La position de ces noeuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique, appelée champ de captage correspondant au terrain d'intérêt pour le phénomène capté.

En l'absence d'information sur la position des éléments d'un réseau de capteurs sans fil au sein de l'environnement où ils sont déployés, les données récoltées peuvent s'avérer d'une utilité limitée. Une étape préalable à tout traitement consiste donc à estimer la position de ces noeuds, à partir de mesures de portée inter-capteurs telles que les RSSI (Received Signal Strength Indication), et de la position supposée connue d'une fraction de capteurs appelés ancres. Ce problème de localisation a fait l'objet de nombreux travaux de recherche.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons au problème de localisation des noeuds dans les réseaux de capteurs sans fil. En effet, vu la nature de déploiement aléatoire des noeuds, ces derniers doivent se localiser afin d'échanger avec précision les grandeurs captées. Dans la littérature, plusieurs techniques d'estimation de la position ont été proposées. Reposant sur le concept de la multilatération, elle consiste à déterminer la position d'un capteur cible à l'aide au moins trois ancres où les distances entre le capteur cible et les ancres sont estimés à partir de la puissance du signal RSSI. Dans ce travail, nous essayons d'optimiser cette estimation en faisant appel aux techniques d'optimisation de Recherche Opérationnelle.

Pour cela notre mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre donne un aperçu général sur les réseaux de capteurs sans fils (RCSFs), présente l'objectif de base des RCSFs, classification des RCSFs, ses caractéristiques, son architecture, facteurs et contraintes de conception d'un RCSF, les principaux services des RCSFs, les différents domaines d'applications, et ainsi que la communication dans les RCSFs.
- Le deuxième chapitre présente un état de l'art de la localisation dans les réseaux sans fils, et le déploiement aléatoire d'un RCSF qui consiste à déterminer les coordonnées physiques ou géographiques de chaque capteur déployé dans le champ de captage (terrain d'intérêt), ainsi que les caractéristiques de localisation, et la nouvelle classification des approches de localisation dans les RCSFs.

- Le troisième chapitre présente les méthodes de localisation géométriques dans les RCSFs, la localisation dans les réseaux de capteurs statiques, les méthodes de localisation s'appuyant sur des ancres deux catégories se distinguent : les méthodes de localisation dites mesure basées (RANGE-BASED) et celles de mesures libres (RANGE-FREE), comparaison des méthodes d'estimation des distances/angles, les familles de méthodes de localisation qui partagent le même schéma d'exécution, la localisation dans les réseaux mobiles, les formes d'implémentation le processus de localisation, et les critères des méthodes de localisation dans les RCSFs.
- Le quatrième chapitre présente notre proposition dans le cas de la localisation des capteurs dans les réseaux de capteurs sans fils, en décrivant les détails et en expliquant chaque phase effectués.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fils (Wireless Sensors Networks)

1.1 Introduction

DANS le monde industriel, un capteur est un dispositif autonome capable de mesurer ou transformer une grandeur physique observée sur son environnement immédiat, (la température, les vibrations, l'humidité, la pression, ou encore la luminosité, etc.) en une grandeur utilisable (intensité électrique, position d'un flotteur) [5].

En effet, grâce aux avancées technologiques de ces dernières années, principalement dans le domaine de la miniaturisation, les capteurs sont devenus des dispositifs de très petite taille (d'une taille miniature) et peuvent être déployés d'une manière dense et aléatoire dans le champ surveillé. Ils sont ainsi dotés de moyens leur permettant de stocker les résultats de leurs observations, d'effectuer un certain nombre de traitement sur ces résultats et les transmettre au monde réel de façon autonome via un support de communication sans fil [1, 2].

Toutes ces caractéristiques apportent au monde scientifique l'opportunité de déployer les capteurs à grande échelle dans des milieux, parfois difficiles voire impossible d'y avoir l'accès, pour surveiller, collecter et transmettre les données collectées à un système capable de les analyser et prendre (si possible nécessaire) les décisions. La position de ces capteurs n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique, appelée champ de captage correspondant au terrain d'intérêt pour le phénomène capté. Ce déploiement aboutit à un réseau de capteurs sans fils (RCSF), ou Wireless Sensor Network (WSN) en anglais [3, 5].

Pour leurs caractéristiques très variées et leur faible coût de production, les RCSFs sont très utilisés dans plusieurs domaines, allant du domaine militaire au domaine médical, en passant par l'industrie, l'écologie, la domotique, l'agriculture de précision, ..., etc. Pour cela, les RCSFs forment un domaine de recherche très vaste et en pleine croissance. Ainsi, mener un travail de recherche dans ce domaine nécessite la connaissance d'un certain nombre de concepts généraux [2, 4].

Dans la suite de ce chapitre, nous verrons ces concepts à travers un certain nombre de points et un plan méthodologique que nous avons adopté. Nous commencerons par donner quelques définitions d'un capteur, l'architecture matérielle et voir comment ces capteurs sont déployés pour former des réseaux de capteurs sans fil, qui seront classifiés et comparés aux réseaux ad hoc classiques. Ensuite, les facteurs et contraintes de conception des RCSFs ainsi que, ses caractéristiques et les domaines d'applications de ces réseaux seront étudiés. Avant de conclure ce chapitre, nous ferons une étude un peu détaillée sur les protocoles de communication destinés aux réseaux de capteurs sans fil.

1.2 Définition d'un capteur

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique autonome doté de mécanismes lui permettant d'accomplir trois tâches complémentaires : le relevé d'une grandeur physique sur son environnement immédiat (la température, les vibrations, l'humidité, la pression, ou encore la luminosité, etc.), le traitement de l'information en une grandeur utilisable (intensité électrique, position d'un flotteur), et de la communiquer à un centre de contrôle via un canal de communication sans-fil par ondes radio [9, 11].

Pour accomplir ces tâches, un capteur est composé principalement des unités de bases suivantes : Unité de Contrôle d'Énergie (Puissance), Unité de Captage, Unité de Traitement (Processeur), Unité de Communication (Transmission) sans fil, Unité de Stockage (Mémoire), Unité de Géo-localisation. Et pour cela, il possède au moins un transducteur dont le rôle est de convertir une grandeur physique en une autre.

1.3 Définition d'un capteur intelligent

Le terme capteur intelligent (smart sensors ou intelligent sensor) a été utilisé dans l'industrie des capteurs pour désigner des capteurs qui ne fournissent pas seulement des mesures, mais aussi une fonctionnalité aux mesures spécifiques [12]. Par rapport à un capteur classique, un capteur intelligent intègre de nombreux éléments électroniques additionnels, ainsi que des unités programmables et des aspects logiciels nécessaires au traitement des données, aux calculs, à la communication numérique [11]. Il est donc caractérisé par sa capacité à effectuer une collecte des mesures, les traiter et à les communiquer au monde extérieur [11, 12].

La deuxième définition étant la plus utilisée pour définir un capteur, on constate que le mot capteur est utilisé par abus de langage pour désigner un capteur intelligent. Pour ne pas rompre avec la terminologie usuelle, dans le reste de notre travail, lorsque nous parlerons d'un capteur, nous sous-entendrons un capteur intelligent [13].

1.4 Les noeuds capteur

Les noeuds capteur, c'est un système qui sert à détecter, sous forme de signal souvent électrique, un phénomène physique. Il existe plusieurs modèles de noeuds capteur commercialisés dans le marché. Parmi les plus célèbres, de ces noeuds capteurs on cite, le **MICAz**, le **MICAxet TelosBe de Crossbow** [14].

En effet, grace au développement il existe trois types de noeuds capteur, parmi ces dernières, on exhibe les noeuds de cible, les noeuds capteurs, et les noeuds puits. Un noeud capteur détecte les signaux générés par un noeud cible et diffuse les données nécessaires au noeud puits. Voici un exemple de noeud capteur **MICAz** illustré sur la figure 1.1 ci-après.



Figure 1.1 : Exemple d'un noeud capteur MICAz.

1.5 Caractéristiques d'un capteur

Un capteur est doté des caractéristiques suivantes [17] :

- Préposition/déploiement aléatoire ;
- Limitation de la durée de vie des batteries ;
- Densité relatif au réseau (petit/grand nombre) ;
- La rapidité : c'est le temps de réaction d'un capteur entre la variation de la grandeur physique qu'il mesure et l'instant où l'information prise en compte par la partie commande ;
- L'étendue de la mesure : c'est la différence entre le petit signal détecté et le plus grand perceptible (découvrir) sans risque de destruction pour le capteur ;
- La sensibilité : c'est la plus petite variation d'une grandeur physique que peut détecter un capteur.

1.6 Architecture physique d'un capteur

Suivant le type d'application, il existe une multitude de capteurs sur le marché : les capteurs de température, d'humidité, de pression, etc. Cependant, malgré cette diversité apparente, ils restent dotés d'une architecture matérielle similaire. Un capteur est composé principalement des unités de bases suivantes : unité de contrôle d'énergie (puissance), unité de captage, unité de traitement (processeur), unité de communication (transmission), unité de stockage (mémoire), unité de géo-localisation.

Des composants additionnels peuvent être ajoutés selon le domaine d'application [1], comme par exemple un système de localisation tels qu'un GPS (Global Positioning System), ou bien un système générateur d'énergie (exemple : cellules solaires). Quelques capteurs, plus volumineux, sont dotés d'un système mobilisateur lui permettant de se déplacer en cas de nécessité. Ces éléments principaux et optionnels (représentés par les traits discontinus) sont visibles sur la figure 1.2 illustrée ci-après.

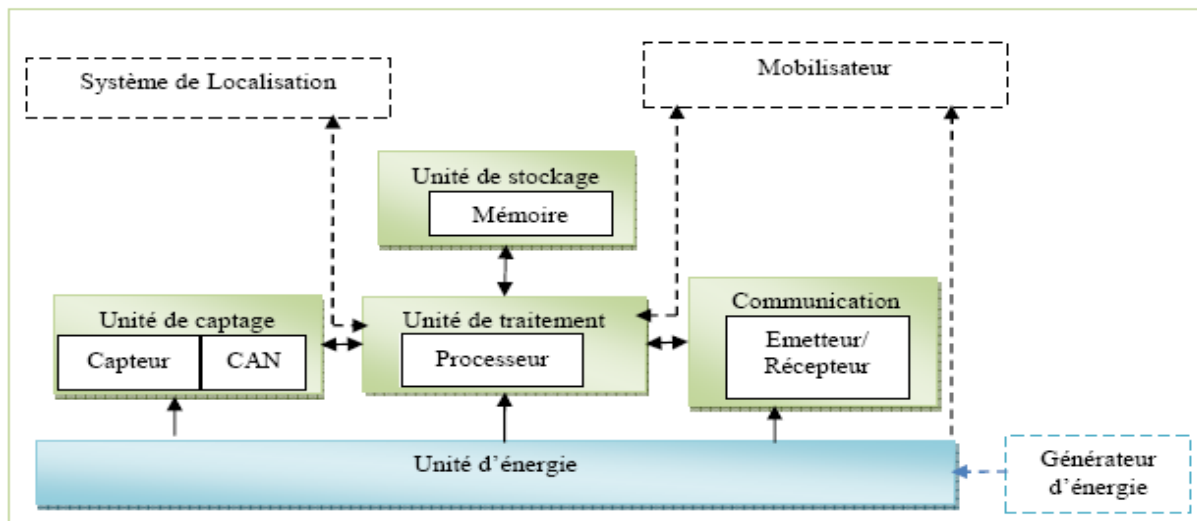


Figure 1.2 : Architecture physique d'un capteur.

1. **Unité de contrôle d'énergie (puissance)** : Un capteur est muni d'une source d'énergie, généralement une batterie, pour alimenter tous ses composants [13]. Les batteries utilisées dans les capteurs peuvent être classées en deux groupes : sont soit rechargeables ou non rechargeables. Souvent, dans les environnements sensibles et dangereux, il est impossible de recharger ou changer la batterie d'un nœud capteur. Pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs et donc d'un réseau de capteurs.

Une batterie est un dispositif complexe dont l'opération dépend de la dimension de la batterie et le type d'électrode utilisé. Par exemple, une batterie d'un volume 1 cm³ peut stocker jusqu'à Ampère-heure. Elle peut être de type : Alkaline, Lithium ou Nickel.

2. **Unité de captage** : La fonction principale de l'unité de captage est de capturer ou mesurer les données physiques à partir de l'objet ou d'une surface cible. Il est composé de deux sous-unités : le Récepteur (reconnaissant la grandeur physique à capter) et le Transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé au convertisseur Analogique/Numérique(CAN). Ce dernier transforme ces signaux analogiques produits par le capteur en données numériques, et en suite les transmet à l'unité de traitement pour effectuer de analyses. Un capteur peut avoir un ou plusieurs unités de captage [14].
3. **Unité de traitements (processeur)** : Il recueille des données des de l'unité de captage ou d'autres capteurs, effectue un traitement sur ces données (si nécessaire) et décide quand et où les envoyer. Il doit exécuter des programmes et des protocoles de communication différents. Les types de processeurs qui peuvent être utilisés dans un capteur incluent le Micro-contrôleur, les DSP (Digital Signal Processors), les FPGA (Field Programmable Gate Array) et les ASIC (Application Specific Integrated Circuit) [14]. Parmi toutes ces alternatives, le Micro-contrôleur a été le processeur le plus utilisé pour les capteurs à cause de sa flexibilité à être reliés à d'autres composants (comme par exemple l'unité de communication), à son bon prix et sa faible consommation énergétique [14, 15, 16].
4. **Unité de communication (transmission)** : Cette unité est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication sans fil [14]. Les différents choix de média de transmission incluent trois modèles (moyens) de communications dans les capteurs : la Radio-fréquence (RF), le Laser et l'Infrarouge.
 - **Le laser** : Le laser consomme moins d'énergie par rapport à la radio, mais il est sensible aux états atmosphériques ;
 - **L'infrarouge** : L'infrarouge comme le laser ne nécessite aucune antenne mais il a une capacité limitée pour la diffusio ;
 - **La radio-fréquence (RF)** : la radio-fréquence est le plus facile à employer, mais il exige une antenne. L'énergie consommée augmente très vite en fonction de la portée de la radio. La consommation typique est de l'ordre de 20 mW pour une portée de quelques dizaines de mètres.
5. **Unité de stockage (mémoire)** : L'unité de stockage inclut la mémoire de programme (dont les instructions sont exécutées par le processeur) et la mémoire de données (pour conserver des données fournies par l'unité de captage et d'autres données locales). La taille de cette mémoire est souvent limitée essentiellement par les considérations économiques et s'améliorera aussi probablement au fil des années [3].
6. **Unité de géo-localisation (système de localisation géographique)** : Dans plusieurs applications RSCFs, les tâches de détection et les techniques de routage ont besoin de connaître la localisation géographique d'un noeud. Alors l'unité de

géo-localisation consiste à doter le noeud capteur d'une instrumentation lui permettant d'identifier automatiquement sa position absolue dans l'espace.

Ce système de géo-localisation peut se composer d'un module de GPS (Caruso et al., 2005) ou technique de triangulation basée sur l'estimation de distance à partir de l'atténuation des ondes radio, des délais de propagation des ondes sources, etc pour un noeud de haut niveau ou bien d'un module de software qui implémente des algorithmes de localisation qui fournissent les informations sur l'emplacement du noeud par des calculs distribués [18].

7. **Le mobilisateur** : Un mobilisateur peut parfois être nécessaire pour déplacer un noeud pour accomplir ses tâches. Le support de mobilité exige des ressources énergétiques étendues qui devraient être fournies efficacement. Le mobilisateur peut, également, opérer dans l'interaction étroite avec l'unité de détection et le processeur pour contrôler les mouvements du noeud [17, 18].
8. **Le générateur d'énergie** : Tandis que l'alimentation par batterie, est la plupart du temps, utilisée dans les noeuds, un générateur électrique supplémentaire peut être utilisé pour des applications où une plus longue vie de réseau est essentielle. Pour des applications extérieures, des piles solaires sont utilisées pour générer l'alimentation électrique. De même, des techniques de récupération d'énergie pour l'énergie thermique ou cinétique, de la lumière, et même des ondes électro-magnétiques, peuvent également être utilisées, en les convertissant en courant électrique [18].

1.7 Définition d'un réseau de capteurs

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)- Wireless Sensor Networks (WSN) en anglais, sont considérés comme un type spécial de réseaux ad hoc, appelé généralement MANET (Mobile Ad hoc Network)[26], est une collection d'unités mobiles munies d'interfaces de communication sans fil, formant un réseau temporaire sans recourir à aucune infrastructure fixe ou administration centralisée, et les noeuds jouent, à la fois, le rôle des hôtes et des routeurs. Les noeuds capteurs sont des capteurs intelligents (smart sensors ou intelligent sensor) [9, 10].

Les noeuds de ce type de réseaux consistent en un grand nombre de noeuds capteurs variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. La position ou la localisation géographique de ces noeuds dans le réseau n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils sont déployés de manière plus ou moins aléatoire (par exemple par largage depuis un hélicoptère), dans une zone géographique appelée zone de captage, qui définit le terrain d'intérêt pour le phénomène capté, afin de surveiller un phénomène physique et de récolter leurs données, et ceci d'une manière autonome [18, 20].

Les noeuds capteurs utilisent une communication sans fil pour acheminer les données captées vers un noeud collecteur appelé noeud puits (sink en anglais), ou station de base (Base Station), et ceci grâce à un routage multi-sauts. Ce dernier peut transmettre ensuite ces données en passant par la communication satellite au noeud Centre de Contrôle, et par le biais d'Internet à l'Ordinateur Central (Utilisateur) <Gestionnaire de tâches> pour analyser ces données et prendre des décisions. Ainsi, l'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres noeuds du réseau, précisant le type de données requises, puis récolter les données environnementales captées par le biais du noeud puits. L'ensemble de ces capteurs, déployés pour une application, forme un réseau de capteurs [4, 9, 21].

1.8 Objectif de base des RCSFs

Les objectifs de base des réseaux de capteurs sans-fil dépendent généralement des applications, cependant les tâches suivantes sont communes à plusieurs applications [17] :

- Déterminer les valeurs de quelques paramètres suivant une situation donnée. Par exemple, dans un réseau environnemental, on peut chercher à connaître la température, la pression atmosphérique, la quantité de la lumière du soleil, et l'humidité relative dans un nombre de sites, etc.
- Détecter l'occurrence des événements dont on est intéressé et estimer les paramètres des événements détectés. Dans les réseaux de contrôle de trafic, on peut vouloir détecter le mouvement de véhicules à travers une intersection et estimer la vitesse et la direction du véhicule.
- Classifier l'objet détecté. Dans un réseau de trafic, un véhicule est-il une voiture, un bus, etc.

1.9 Architecture physique d'un RCSF

Les réseaux de capteurs sont des systèmes qui regroupent plusieurs noeuds capteurs ou tout simplement capteurs, permettant de capter et collecter des événements, d'analyser les traitements et de transmettre les informations recueillies dans différents environnements.

Ces noeuds peuvent avoir des positions fixes ou bien être déployés aléatoirement pour surveiller une zone cible. Cette zone peut être géographique ou délimitée par un système plus ou moins étendu. Les communications dans un réseau de capteurs se font souvent sur la base d'un modèle de communication multi-sauts [4].

L'écoulement des données se termine vers les points de collectes, ces derniers sont des noeuds spéciaux, appelés noeuds-puits ou stations de base (Sink en anglais), fait l'inter-

face entre le réseau de capteurs sans fil et l'utilisateur. Ces noeuds-puits sont des bases de contrôle qui possèdent plus de ressources matérielles et permettent de collecter et stocker les informations issues des capteurs [21].

En d'autres termes le fonctionnement d'un réseau de capteurs se déroule de la manière suivante :

- Les noeuds de capteurs sont déployés dans une zone appelée zone de captage ou zone d'intérêt pour la surveiller.
- Par principe, les capteurs sans fil communiquent par le biais des ondes radio-électriques, et grâce à un réseau dit ad-hoc, capable de s'organiser sans infrastructure définie préalablement. Les noeuds capteurs sont doués de mesurer des grandeurs physiques, chimiques ou biologiques, de traiter ces informations et de les stocker. Ils sont alimentés électriquement via une batterie individuelle optimisée pour des tâches comme le traitement de l'information et la communication.
- Lorsqu'un noeud de capteur détecte un évènement, il le traite localement et l'achemine indépendamment ou avec l'aide des autres capteurs vers les points de collecte, appelé puits ou station de base via une communication multi-saut, et de la communiquer à un centre de contrôle par un canal de Communication Satellite.
- Ce dernier, lui permettant de transmettre ensuite ces données par le biais d'Internet à l'ordinateur central < Gestionnaire ou Coordinateur de Tâches >, ce qui fait l'interface entre la zone de surveillance et l'utilisateur.

Le problème majeur dans les réseaux de capteurs est la consommation d'énergie, qui est fortement affectée par les communications entre les noeuds de capteurs. Pour résoudre ce problème de minimisation de la consommation d'énergie, un type de regroupement des noeuds capteurs < clustering >, peut également être appliqué. Les noeuds capteurs sont organisés en groupes, chaque groupe a un Chef de Cluster, et ce dernier joue le rôle d'un point d'agrégation [18].

Ces points d'agrégation qui sont introduits dans le réseau, ce sont des noeuds réguliers qui reçoivent les données provenant des noeuds voisins. Ils effectuent un certain type de traitement, puis ils transmettent les données filtrées au prochain saut.

La communication au sein d'un groupe doit passer à travers le chef, qui ensuite la transmet à un autre chef du cluster voisin jusqu'à ce qu'il atteigne sa destination, la station de base. Ce dernier peut router en suite ces informations en passant par la communication satellite au noeud Centre de Contrôle, et par le biais d'Internet au noeud Gestionnaire de Tâches. Cela réduit le nombre total de messages échangés entre les noeuds capteurs, et permet d'économiser de l'énergie. Ce processus est illustrée dans la Figure 1.3.

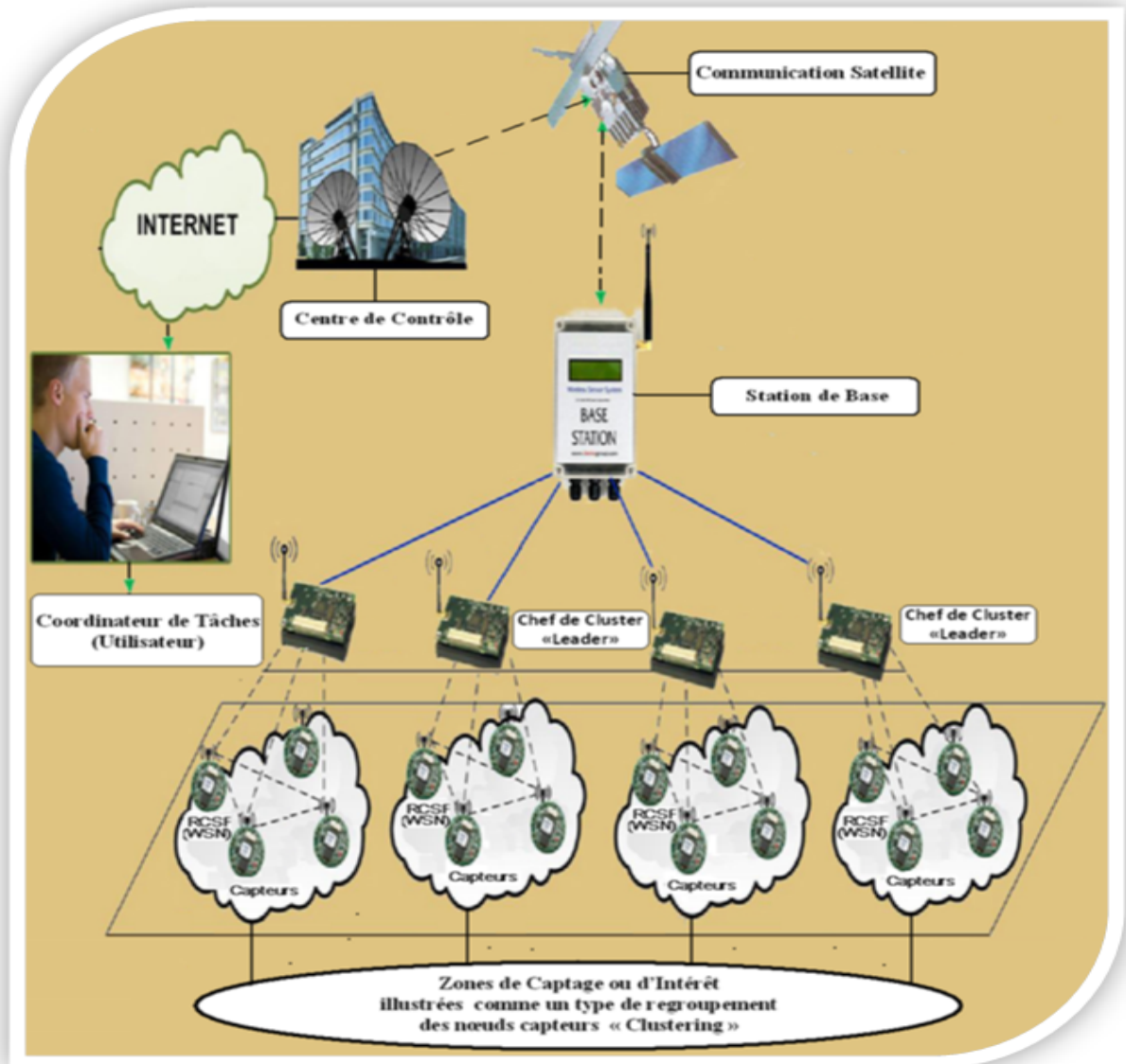


Figure 1.3 : Architecture physique d'un réseau de capteurs sans fil.

1.10 Classification des RCSFs

Les réseaux de capteurs peuvent être classifiés en catégories basés sur plusieurs critères. En effet, pour chaque type d'application, ces réseaux ont des caractéristiques différentes. Ils se distinguent par le mode d'acquisition et de livraison des données au puits, la distance entre les noeuds capteurs et le puits, le modèle de mobilité dans le réseau, les capacités des noeuds du réseau, etc [5, 16, 22].

1.10.1 Selon le mode d'acquisition et de livraison des données au puits (station de base)

Dans les réseaux de capteurs, le modèle d'acquisition et de livraison des données au puits dépend de l'application et de ses exigences. Il peut être : continu (time-driven), événementiel (event-driven), à base de requête (query-driven), ou hybride.

- Dans le modèle continu, les noeuds doivent périodiquement (intervalle de temps constant) réveiller leurs émetteurs pour envoyer les données captées au puits. Le type d'application visé concerne les applications de type surveillance où le but principal est d'avoir une information régulière de la zone surveillée.
- Dans le modèle orienté événements, les capteurs envoient leurs mesures seulement lorsqu'il y a un événement qui se produit. Ce type de modèle est recommandé pour les applications de surveillance d'événements critiques où le but principal est l'obtention d'une information sur l'événement le plus rapidement possible.
- Dans le modèle orienté requêtes, les capteurs mesurent des phénomènes et stockent ces mesures dans leur mémoire. Ils envoient ces mesures seulement lorsqu'ils reçoivent des requêtes de la station de base. Le modèle hybride est une combinaison des trois modèles précédents.

1.10.2 Selon la distance entre les noeuds capteurs et le puits (station de base)

Dans cette classification, on distingue les réseaux multi-sauts (multi-hop WSN) des réseaux à un seul saut (Single-hop WSN) [22].

- Dans un réseau de capteur à un simple saut, les noeuds capteurs sont dans le voisinage immédiat du puits. Ils envoient alors leurs données captées directement au puits (à une station de base) sans passer par aucun autre noeud intermédiaire.
- Tandis que dans le réseau de capteur multi-sauts, à distance entre les quelques noeuds capteurs et le puits dépasse leur portée maximale. Les noeuds capteurs peuvent envoyer leurs données au puits en passant par des noeuds intermédiaires, où ils doivent le faire par l'intermédiaire d'autres noeuds, et dans ce cas les noeuds intermédiaires exécutent une fonction de routage. Ce type de réseau a une large gamme d'application mais est difficile à mettre en oeuvre.

1.10.3 Selon le modèle de mobilité dans le réseau

Cette classification consiste en une combinaison entre la mobilité des noeuds capteurs et celle du puits. Par cette combinaison, nous pouvons distinguer deux grandes catégories de réseaux selon la distribution des noeuds capteurs : réseaux statiques (stationnaires), et réseaux dynamiques ou mobiles (static and mobile networks) [15, 28, 29].

- Dans le réseau statique (ou stationnaires), les positions des noeuds capteurs sont fixés, et le contrôle de ce réseau est simple et son implémentation est facile. On peut par exemple avoir un réseau constitué de capteurs fixes dédiés dans la plupart du temps à la surveillance d'occurrence d'événements sur une zone géographique, et les données capturées sont transmises en mode multi-sauts au noeud puits fixe, et les localisations des noeuds puits sont connues à l'avance par tous les noeuds du réseau. Ce dernier est un noeud particulier doté généralement de ressources supérieures à celle d'un noeud ordinaire. Ce noeud peut être connecté par un canal de communication satellite ou possède un lien radio de type GSM (Global Système for Mobile Communication) ou GPRS (Global Packet Radio Service) lui permettant d'envoyer les informations recueillies à un centre de contrôle pour exploitation, et de transmettre ensuite ces informations par le biais d'internet au coordinateur de tâches.
- Cependant, dans plusieurs cas, les endroits des noeuds capteurs ne sont pas disponible à priori comme ceux lancés à partir d'un avion. Donc, les noeuds capteurs doivent fonctionner dans le mode dynamique. Ce dernier est plus flexible mais nécessite plus d'algorithmes de contrôle. On peut par exemple avoir un réseau constitué d'un ensemble de noeuds capteurs mobiles et d'un puits fixe (réseau à puits statique et à noeuds capteurs mobiles). Ce type de réseaux est généralement utilisé dans l'exploration de zones inaccessibles ou dangereuses.

1.10.4 Selon les capacités des noeuds du réseau

Dans cette classe, on distingue les réseaux homogènes des hétérogènes. Dans un réseau de capteurs homogène, tous les noeuds du réseau (noeuds capteurs, le(s) puits, les passerelles) ont les mêmes capacités du point de vue énergie, calcul et stockage. Alors que, dans un réseau de capteurs hétérogène il y a quelques noeuds sophistiqués qui ont plus de capacité de traitement et de communication que les noeuds normaux. Cela améliore l'efficacité énergétique et prolonge la vie de réseau [22, 23].

- L'avantage d'un tel réseau est que ces noeuds sophistiqués peuvent être utilisés pour exécuter les tâches plus complexes comme les coordinateurs, les chefs du cluster (cluster head), etc.
- Son inconvénient est qu'il est difficile de mettre en place un tel réseau du fait qu'au moins chaque type de noeuds du réseau aura un code (programme) propre à lui. Ce qui augmente le coût de développement.

1.10.5 Selon la densité des noeuds capteurs

Dans cette classe, un réseau de capteur peut être classifié en un réseau agrégeant ou non agrégeant. Dans ce dernier, toutes les données d'un seul noeud seront envoyées à une destination. Le volume des calculs au niveau des noeuds intermédiaires est relativement

petit. Cependant, la charge du trafic dans le système entier peut augmenter rapidement avec plus d'énergie consommée dans les communications. Le système non agrégeant est valable dans un réseau de capteurs où les noeuds ont moins de densité et suffisamment de capacité.

Dans un réseau agrégeant, le réseau est organisé en clusters (groupes) dont chacun est représenté par un chef (ou cluster Head). Ce dernier recevra des informations à partir de ses noeuds voisins et les transmettra vers une station de base. Le regroupement des noeuds en clusters permet de réduire la complexité des algorithmes de routage, d'optimiser la ressource médium en la faisant gérer localement par un chef de cluster, de faciliter l'agrégation des données, de simplifier la gestion du réseau et en particulier l'affectation d'adresses et d'optimiser les dépenses d'énergie. Le système agrégeant est valable pour les réseaux à grande échelle où les noeuds capteurs sont massivement distribués [24].

1.11 Comparaison entre les RCSFs et les réseaux Ad-hoc classiques

Les RCSF sont souvent comparés aux réseaux ad hoc (ou MANET, pour Mobile Ad hoc NETwork [26]) traditionnels car ces deux types de réseaux partagent beaucoup de points communs. Parmi les caractéristiques les plus remarquables des RCSF, qui les convergent justement des MANETs, sont les suivantes [1, 25] :

- ✓ Tous les deux sont des réseaux sans fil, ce qui fait que la portée de communications est limitée par la capacité de rayonnement des antennes utilisées et les puissances mises en jeu. Ainsi, les noeuds dans ces types de réseaux sont souvent des configurations multi-sauts ;
- ✓ Tous les deux sont des réseaux ad hoc, c'est à dire, ils fonctionnent sans avoir besoin d'une infrastructure pour la gestion des échanges. De ce fait, ils ont besoin d'être auto-configurables ;
- ✓ Ces réseaux travaillent sur une bande de fréquences non propriétaire, ce qui rend leurs communications vulnérables aux problèmes d'interférences ;
- ✓ Les entités de ces réseaux sont souvent alimentées par des batteries ;

Malgré les points sur lesquels ces deux type de réseaux convergent, ils diffèrent sur plusieurs aspects. Parmi les points les plus remarquables sur lesquels ils divergent [1, 25, 27], on cite :

- ✓ Les entités d'un réseau MANET sont souvent utilisées directement par des êtres humains, comme les portables, les PDA, etc. Dans les réseaux de capteurs sans fil les entités interagissent essentiellement avec la nature ou l'environnement ou entre elles ;

- ✓ Le nombre de noeuds dans un réseau de capteur peut-être beaucoup plus important que dans les réseaux ad hoc (forte scalabilité) ;
- ✓ Les capteurs peuvent être densément déployés (forte densité) ;
- ✓ Le fait que les noeuds du réseau dans un RCSF sont souvent déployés dans des environnements hostiles (forêts, volcans, etc.) les rend vulnérables et risque de tomber en panne beaucoup plus souvent que les noeuds dans un réseau MANET (tolérance aux pannes) ;
- ✓ La topologie des capteurs change fréquemment du fait des pannes des noeuds ou de leur mobilité (flexibilité) ;
- ✓ Les échanges de données dans les applications d'un réseau RCSF sont souvent du type collecte de données. Les noeuds doivent envoyer vers un puits des informations sur des phénomènes observés (modèle de communication many-to-one) alors que les applications des réseaux MANET sont plus orientées calcul distribué et donc le trafic circule entre tous les noeuds du réseau et dans tous les sens (modèle de communication any-to-any) ;
- ✓ Les réseaux de capteurs fonctionnent en mode diffusion, c'est-à-dire utilisent principalement les communications broadcast alors que la plupart des réseaux ad hoc sont basés sur les communications classiques point à point (pair-à-pair) ;
- ✓ Les noeuds capteurs sont caractérisés par des ressources plus limitées (ressource d'énergie, puissance de calcul et mémoire). Les noeuds dans un MANET sont plus puissants et possèdent des capacités beaucoup plus importantes ;
- ✓ Les RCSF sont qualifiés de réseaux à basse consommation et à bas débit (Low-Power Low-Rate Wireless Personal Area Network, LP-LR-WPAN), ceci n'est pas le cas des MANET, même si les noeuds d'un MANET sont souvent alimentés sur batteries, ils sont facilement rechargeables ;
- ✓ Les noeuds capteurs ne possèdent aucune identification (ID) globale tel que les adresses IP dans les réseaux ad hoc.

1.12 Facteurs et contraintes de conception d'un RCSF

La conception et la mise en place des RCSFs sont influencées par plusieurs contraintes qui peuvent être des contraintes conceptuelles ou matérielles. Ces facteurs importants servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les réseaux de capteurs ; ils sont considérés également comme métriques de comparaison de performances entre les différents travaux dans le domaine [9, 17, 29, 30].

1.12.1 Les contraintes conceptuelles

La conception des RCSFs, leurs protocoles et algorithmes sont guidés par plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs, nous citons les suivants :

1. **La tolérance aux pannes** : Certains noeuds peuvent devenir défaillants après un certain temps de fonctionnement. Cependant, le réseau doit être capable de maintenir ses fonctionnalités sans interruption en cas de défaillance ou le blocage d'un de ses capteurs. Cette défaillance peut être engendrés par plusieurs causes, notamment l'épuisement ou perte d'énergie, l'endommagement physique, ou les interférences liées à l'environnement.

Ces problèmes ne devraient pas affecter le reste du réseau. Par contre, ils devront adapter leur niveau de tolérance aux pannes en fonction de l'hostilité du milieu dans lequel est déployé le réseau. Le degré de tolérance dépend du degré de criticité de l'application et des données échangées.

Un premier défi sera donc d'identifier et de modéliser formellement les modes de défaillances des capteurs, puis de repenser aux techniques de tolérance aux fautes à mettre en oeuvre sur le terrain.

2. **Le passage à l'échelle ou l'échellonabilité (la scalabilité)** : Le facteur d'échelle, est l'une des caractéristiques des RCSF, le nombre de noeuds capteurs déployés peut atteindre des centaines, des milliers de noeuds capteurs. Le réseau doit être capable de fonctionner avec ce nombre de capteurs tout en permettant l'augmentation de ce nombre et la concentration (densité) des noeuds dans une région (pouvant dépasser 20 noeuds/m³). Les protocoles et algorithmes devront pouvoir fonctionner correctement dans tous les nouveaux cas de schémas, et ceci afin de pouvoir garantir un bon fonctionnement avec ce nombre élevé de capteurs.
3. **Le coût de production** : Le coût de production d'un seul capteur est très important pour l'évaluation du coût global du réseau. Si ce dernier est supérieur à celui nécessaire pour le déploiement des capteurs classiques, l'utilisation de cette nouvelle technologie ne serait pas financièrement justifiée, alors le RCSF n'est pas justifié économiquement. Par conséquent, réduire le coût de production jusqu'à moins de 1 dollar par noeud est un objectif important pour la faisabilité de la solution des réseaux de capteurs sans fil.
4. **Média ou support de transmission** : Les noeuds communicants sont reliés sans-fil. Ce lien peut être réalisé par radio, signal infrarouge ou un média optique. Il faut s'assurer de la disponibilité du moyen de transmission choisi dans l'environnement de capture afin de permettre au réseau d'accomplir la totalité de ses tâches. Pour les liens de communication via les fréquences radio, les bandes ISM (Industrial Scientific Medical bands) peuvent être utilisées. Pour les réseaux de capteurs, les unités de transmission intégrées au niveau des noeuds doivent être de petite taille et a faible consommation d'énergie.

5. **Topologie du réseau** : La forte probabilité de panne d'un noeud capteur ou la possibilité de rajouter des capteurs donne le pouvoir à une topologie de changer dynamiquement. Il faut donc gérer avec précision la maintenance et les changements de cette topologie. On distingue trois phases :
- **Le pré déploiement** : Les capteurs peuvent être éparpillés (manuellement ou par avion) ou placés précisément (manuellement ou par robots) ;
 - **Le post déploiement** : A cause des pannes, des déplacements de capteurs ou d'obstacles mobiles, la topologie doit parfois être changée après le déploiement ;
 - **Le redéploiement** : Des noeuds capteurs peuvent être déployés dans un deuxième temps pour remplacer ceux tombés en panne ou détruits. La encore la topologie devra s'adapter.
6. **L'environnement de déploiement** : Les noeuds peuvent être déployés tout près ou en son sein de l'objet à surveiller. Les noeuds capteurs doivent être conçus d'une manière à résister aux différentes et sévères conditions de l'environnement : forte chaleur, pluie, humidité, etc. De même, le déploiement peut être à l'intérieur d'une grosse machine, au fond d'un océan, dans un lieu contaminé biologiquement ou chimiquement, dans un champ de bataille, dans une maison ou un immeuble, sur un véhicule, etc. Ces situations très variées engendrent des contraintes très fortes de l'environnement sur les noeuds capteurs.
7. **Consommation d'énergie** : Les noeuds capteurs, étant des dispositifs micro-électroniques, ils peuvent être équipés seulement d'une sources d'énergie limitées ($\prec 5$ Ampère-heure, 1.2 V). De plus, dans certains scénarios d'application, ces noeuds ne peuvent pas être dotés de mécanismes de rechargement d'énergie, il est impossible de réapprovisionner de l'énergie.

Par conséquent, la durée de vie d'un noeud capteur dépend fortement de la durée de vie de la batterie associée. Sachant que les réseaux de capteurs sont basés sur la communication multi-sauts, chaque noeud joue à la fois un rôle d'initiateur de données et de routeur également, le mal fonctionnement d'un certain nombre de noeud entraîne un changement significatif sur la topologie globale du réseau, et peut nécessiter un routage de paquets différent et une réorganisation totale du réseau. C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs, et le changement de sa topologie rendent la gestion et la conservation d'énergie d'une haute importance. [18]

Les taches principales d'un noeud capteur se résument dans la détection d'un évènement, traitement des données perçues et leurs transmissions.

7.1. Energie de captage des données : Elle est utilisée lors des opérations suivantes :

- ✓ Échantillonnage ;
- ✓ Traitement du signal ;
- ✓ Conversion Analogique/Numérique(CAN) ;
- ✓ Activation de la sonde du capteur.

En règle général ; l'énergie de capteur représente un faible pourcentage de l'énergie totale.

7.2. Energie de traitement des données : cette énergie se décline en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la capacité totale commutée au niveau logiciel. Si l'unité de calcul n'effectue aucun traitement, l'énergie consommée correspond à ce qu'on appelle l'énergie de fuite.

L'énergie nécessaire aux traitements est très faible par rapport à celle exigée pour la communication des données.

7.3. Energie de communication des données : L'émission et la réception des données dans la plus part des réseaux de capteurs sans fil sont assurées par des circuits radio-fréquences (RF). L'énergie de communication présente la plus grande proportion de l'énergie totale consommée au niveau d'un noeud capteur. Elle est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisé par sa l'énergie consommée sra plus élevée.

8. **Sécurité physique limitée :** Al'instar des réseaux ad-hoc, les réseaux de capteurs sans fil sont plus vulnérables ou touchés par le paramère de sécurité que les réseaux filaires classiques, mais cela se justifie par les contraintes matérielles (capacité de calcul limitée ou encore les caractéristiques de la transmission en milieu ouvert) qui imposent un contrôle minimal des données.
9. **La connectivité :** Un réseau de capteurs est dit connecté si et seulement si, il existe au moins une route entre chaque paire de noeuds. La connectivité dépend essentiellement de l'existence des routes. Elle est affectée par changement de topologies dus à la mobilité, la défaillance des noeuds, les attaques, etc. Ce qui a pour conséquences : la perte de liens, l'isolement des noeuds, le partitionnement du réseau, la mise à jours des routes (le routage), etc. La connectivité est une mesure de tolérance au fautes ou de diversité de chemin dans le réseau.

10. **Le système d'exploitation :** TinyOS (Tiny Operating System) est un système d'exploitation open-source conçu pour les réseaux de capteurs sans fil. Il est principalement développé et soutenu par l'université américaine de Berkeley, qui le propose en téléchargement sous la licence BSD (Berkeley Software Distribution), une licence libre utilisée pour la distribution de logiciels et en assure le suivi. Le caractère open source permet à ce système d'être régulièrement enrichie par une multitude d'utilisateurs. Pour sa conception ou le développement des applications légères, il n'existe actuellement qu'un langage de programmation capable d'interagir avec le système d'exploitation TinyOs qui est écrit en NesC, langage orienté composant syntaxiquement proche du C.

Un programme qui s'exécute sur TinyOS est constitué d'une sélection de composants systèmes et de composants développés spécifiquement pour l'application à laquelle il sera destiné (acquisition de température, du taux d'humidité, etc.).

TinyOS s'appuie sur un fonctionnement événementiel, c'est-à-dire qu'il ne devient actif qu'à l'application de certains événements, par exemple l'arrivée d'un message radio. Le reste du temps, le capteur se trouve en état de veille, garantissant une durée de vie maximale connaissant les faibles ressources énergétiques des capteurs.

1.12.2 Les principaux services des RCSFs

Les principaux services utilisés par la plupart des applications des RCSFs à grande échelle sont listés comme suit : la synchronisation, la localisation (la découverte d'endroit), l'agrégation de données, le stockage de données, la gestion de topologie, et le routage de messages.

1. **La synchronisation :** La synchronisation est un service essentiel dans les RCSFs, et les nœuds capteurs doivent être synchronisés pour coordonner correctement leurs opérations de captage, et ceci à l'aide d'une horloge globale [31].

Une horloge globalement synchronisée permet aux nœuds capteurs d'estampiller correctement les événements détectés. La chronologie, la durée, et la période appropriée entre ces événements peuvent alors être déterminées. En cas d'estampillage incorrect, dû aux facteurs tels que la dérive d'horloge, la station de base va réunir les paquets reçus dans un ordre chronologique incorrect.

Les nœuds capteurs peuvent conserver la vie des batteries en se mettant hors tension. Une fois correctement synchronisés, les nœuds peuvent s'allumer simultanément. Une autre fois mis sous tension, les nœuds peuvent transmettre des messages à la station de base et plus tard se mettre hors tension encore pour conserver l'énergie. Les nœuds non synchronisés ont comme conséquence l'augmentation du délai, tandis qu'ils attendent des nœuds voisins pour allumer leurs radios, et dans le plus mauvais cas, des messages transmis peuvent être perdus.

2. **La localisation :** Le rôle des RCSFs étant souvent la surveillance d'un espace donné, et la localisation y joue un rôle primordial [39]. La découverte d'endroit est de trouver l'information de position des noeuds capteurs, exprimée comme des coordonnées globales. Ces dernières, sert de base fondamentale aux services de réseaux de capteurs additionnels où la connaissance d'endroit est exigée, comme le routage de messages. En outre, dans les applications telles que la détection du feu, il n'est pas suffisant de déterminer si un feu est présent car le lieu de l'incendie dans ce cas est très important [20].
3. **L'agrégation de données :** L'agrégation de données, appelée aussi fusion de données et la diffusion de requêtes ont une grande importance dans les RCSFs [32]. Les noeuds capteurs ont typiquement la contrainte d'énergie. Par conséquent, il est souhaitable de réduire au minimum le nombre de messages ou d'informations transmis, parce que les transmissions par radio peuvent rapidement consommer la puissance de la batterie.

Dans les RCSFs, les données produites par les noeuds capteurs voisins ou de la même proximité sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base des d'informations redondantes. La collaboration locale permet à des noeuds voisins de filtrer et traiter les informations redondantes captées avant de les transmettre à la station de base. En conséquence, ce processus peut réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les noeuds capteurs à la station de base. Ceci est entrène de réduire la consommation d'énergie dans le RCSF, et ainsi d'améliorer sa durée de vie [33].

Divers types d'agrégation de données sont possibles, selon le niveau d'amélioration désiré. Le traitement au niveau du réseau peut être conçu pour effectuer un ou plusieurs opérations, sont les suivants :

- ✓ Agréger les données dans une valeur binaire simple.(c'est-à-dire, Vrai ou Faux). Une valeur booléenne serait suffisante pour indiquer par exemple un animal ou un militaire était détecté ou pas ;
 - ✓ Agréger les données collectées dans une zone, à base de coordonnées qui définissent la région ;
 - ✓ Agréger les données rassemblées en appliquant une agrégation spécifique ou une fonction de filtrage. Comme exemple, la moyenne, le maximum, le minimum, ou la somme de valeurs captées, peuvent être calculés en route avant l'expédition de n'importe qu'elle information reçue.
4. **Stockage de données :** Le stockage de données présente un défi unique aux réalisateurs. L'information d'évènement rassemblée par différents noeuds doit être stockée à certain endroit. Dans certains cas, où une zone de stockage n'est pas disponible, les données doivent être stockées dans les réseaux de capteurs [34, 35].

Trois paradigmes de stockage de données employables dans les réseaux de capteurs sont répertoriés :

4.1. Stockage Externe : Quand un noeud capteur détecte un évènement, les données correspondantes sont transmises à une station de base du stockage externe situé en dehors du réseau. L'avantage de cette approche est que les requêtes posées au réseau n'encourent aucune dépense énergétique puisque toutes les données sont déjà extérieurement stockées.

4.2. Stockage Local : Dans ce modèle, quand un noeud capteur détecte un évènement, l'information de l'évènement est stockée localement au noeud. L'avantage de cette approche est qu'aucun coût initial de communication n'est encouru. Les requêtes sont diffusées à tous les noeuds capteurs. Parmi ces derniers, qu'ont l'information désirée transmettent leurs données à la station de base.

4.3. Stockage Donnée-Central : L'information d'évènement est routée à un endroit prédéfini, indiqué par une fonction d'informations géographique (GHT), dans le réseau de capteurs. Les requêtes sont dirigées vers le noeud capteur qui contient l'information appropriée, qui transmet la réponse à la station de base pour une transformation plus ultérieure.

5. Gestion de topologie : Selon Tilak et Al [5], le déploiement dense des noeuds capteurs rend le réseau plus efficace et si la topologie n'est pas soigneusement contrôlée, ceci peut mener à un grand nombre de collisions et à un encombrement potentiel du réseau. En conséquence, il y a une plus grande latence et une réduction de l'efficacité énergétique globale du réseau [20]. Plusieurs techniques en vue d'optimisation de l'énergie, peuvent intervenir dans la mise en place d'un réseau de capteurs : Auto-configuration, Clusterisation, et Auto-adressage.

5.1. Auto-configuration : L'auto-configuration consiste à élire un chef, à créer une topologie du réseau, effectuer les opérations nécessaires à la mise en oeuvre de l'objectif du réseau de capteurs. Le premier choix à effectuer est certainement celui de l'adressage.

5.2. Clusterisation : L'agrégation de noeuds capteurs en clusters permet de réduire la complexité des algorithmes de routage, de faciliter l'agrégation des données, de simplifier la gestion du réseau et en particulier l'affectation d'adresses, d'optimiser les dépenses d'énergie et en fin de rendre le réseau plus scalable.

L'utilisation de clusters permet aussi de stabiliser la topologie si les tailles de clusters sont grandes par rapport aux vitesses des noeuds capteurs

5.3. Auto-adressage : L'attribution d'une adresse unique à un capteur doit se faire de manière automatique. Une classification de différents mécanismes d'auto-adressage était proposée [37], elle les sépare en deux grandes familles, sont les suivantes : les protocoles de types stateful, et ceux de types stateless.

6. **Routage de messages :** Les réseaux de capteurs peuvent contenir des centaines ou des milliers de noeuds capteurs. Des protocoles de routage doivent être conçus pour réaliser un degré acceptable de tolérance aux fautes à la présence des défaillances des noeuds, tout en réduisant au minimum la consommation d'énergie [38, 40].

1.12.3 Les contraintes matérielles

Un noeud capteur est constitué de composants consommant de l'énergie électrique, comme il peut aussi avoir des modules dédiés à l'application ou destinés à la localisation ou au mouvement. Par conséquent, la capacité de la batterie d'alimentation du noeud forme une contrainte matérielle forte, et parmi les contraintes matérielles liées aux RCSFs, on peut citer :

1. **Dimension des capteurs :** La taille réduite des capteurs peut présenter de nombreux avantages, elle permet un déploiement flexible et simple du réseau. Cependant, la puissance des batteries utilisées pour alimenter les noeuds capteurs est limitée, par la petite taille de ces derniers.
2. **Puissance de calcul des capteurs :** Les processeurs des réseaux de capteurs sont différents de ceux d'une machine classique. Car ils utilisent souvent des micro-contrôleurs de faibles fréquences.

À part la taille, il existe d'autres contraintes exigeantes pour la construction des noeuds capteurs qui sont les suivantes :

- ✓ Consommer le minimum d'énergie ;
- ✓ Opérer dans une haute densité ;
- ✓ Avoir un coût de production réduit,
- ✓ Être autonome et pouvoir opérer sans assistance ;
- ✓ Être adaptatif à l'environnement.

1.13 Domaines d'application des RCSFs

La taille de plus en plus réduite des micro-capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations, etc.) ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs d'envahir rapidement plusieurs domaines d'applications [41]. Ils permettent aussi d'étendre les applications existantes et de faciliter la conception d'autres systèmes tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage.

Les réseaux de capteurs ont le potentiel de révolutionner la manière même de comprendre et de construire les systèmes physiques complexes. Il 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, environnemental, écologique, domestique, médicales (santé), sécurité, commercial, industrielles, Agriculture de précision, et le bâtiment, etc. D'autres catégories peuvent être considérées telles que l'exploitation de l'espace, le traitement chimique et le contrôle des désastres.

1. **Applications militaires [42]** : Certaines applications militaires utilisent les RCSF afin de contrôler les différentes troupes, de surveiller le champ de bataille de surveiller toutes les activités des forces ennemies ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'attaque nucléaire, d'agents chimiques, biologiques ou de radiations).
2. **Applications environnementales [43]** : Les applications des RCSF pour l'environnement incluent la poursuite du mouvement des oiseaux, de petits animaux, et des insectes ainsi que du contrôle des conditions de l'environnement qui affectent les produits agricoles, la détection de feu de forêt, la détection d'inondation, étude de pollution, l'exploration planétaire, etc.
3. **Applications écologiques [42]** : L'intégration de plusieurs micro-capteurs dans le système de climatisation et de chauffage des immeubles. Ainsi, la climatisation ou le chauffage ne sont déclenchés qu'aux endroits où il y a des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire. Le système distribué peut aussi maintenir une température homogène dans les pièces. Utilisée à grande échelle, une telle application permettrait probablement de réduire la demande mondiale en énergie.
4. **Applications domestiques [44]** : 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. En plaçant, sur le plafond ou dans le mur, des capteurs, on peut économiser l'énergie en gérant l'éclairage ou le chauffage en fonction de la localisation des personnes et seulement si c'est nécessaire.
5. **Applications médicales (santé) [45]** : L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine de la médecine pourrait apporter une surveillance permanente des patients, de contrôler le rythme cardiaque des patients, et une possibilité de collecter des informations physiologiques humaines de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic et la télésurveillance de quelques maladies.
6. **Applications commerciales** : Suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré, connaître la position, l'état et la direction d'un paquet.

7. **Applications industrielles [44]** : L'intégration des micro-capteurs dans un processus de stockage et de livraison de marchandises peut être utilisée pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. 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. La figure 1.4 ci-dessous montre quelques domaines d'application cités précédemment.
8. **Applications dans l'agriculture de précision** : Les réseaux de capteurs sont capables d'apporter des bénéfices considérables au domaine d'agriculture, grâce à leur habilité de surveiller les taux de pesticides dans l'eau, le degré d'érosion du sol, détection de parasites, et le niveau de pollution de l'air en temps réel.
9. **Applications dans le bâtiment** : Lors de tremblements de terre, pour aider les secouristes à retrouver les victimes (capteurs emprisonnés dans le béton à la construction qui détectent le niveau de bruit).

La figure 1.4 ci-dessous montre quelques domaines d'application cités précédemment.

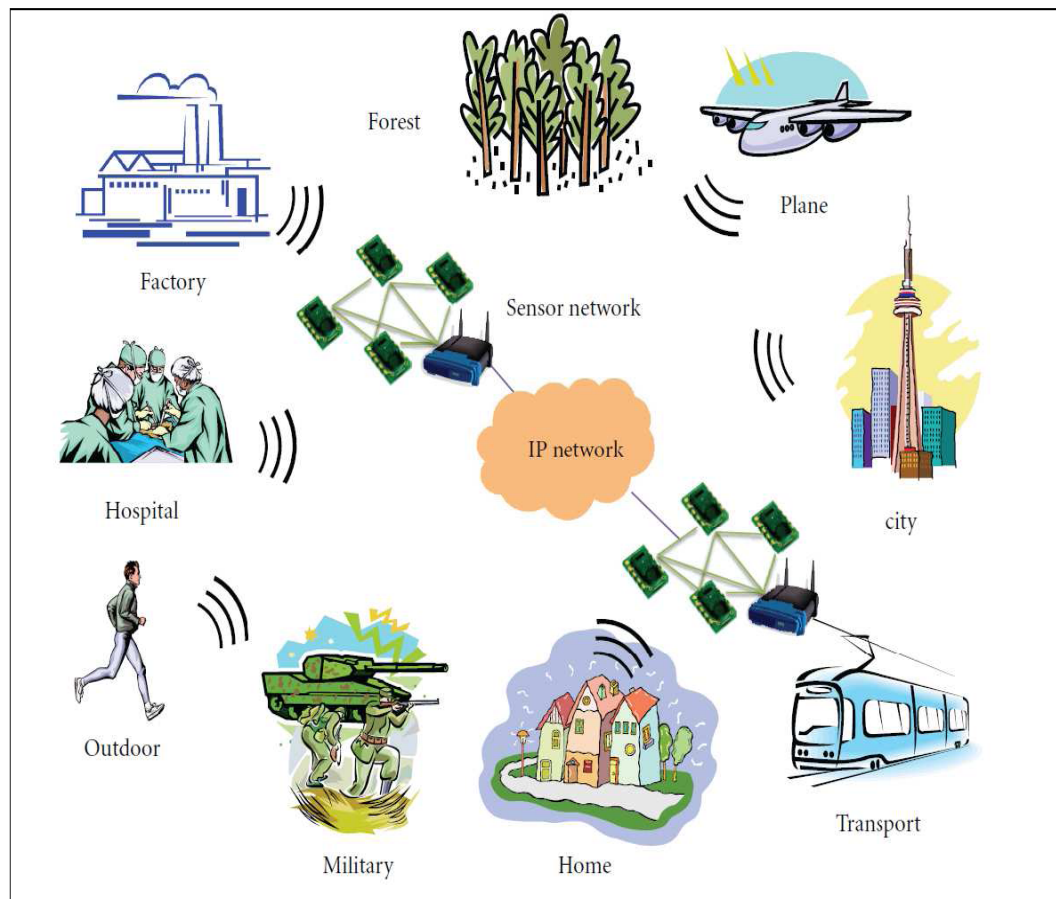


Figure 1.4 : Quelques domaines d'application pour les RCSFs.

1.14 La communication dans les RCSFs

1.14.1 Couches de la pile protocolaire pour la communication dans les RCSFs

Dans le but d'un établissement efficace d'un RCSF, une architecture protocolaire est adoptée afin d'améliorer la robustesse du réseau. Le rôle de cette pile protocolaire consiste à standardiser la communication entre les composants du réseau afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits (logiciels ou matériels) compatibles [27, 28, 29, 30].

Ce modèle en couches utilisé par le noeud puits (ou station de base), ainsi que tous les autres capteurs du réseau comprend cinq couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI (Open Systems Interconnexion) de l'ISO (International Standardization Organization). Citons la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données, et la couche physique.

De plus, cette pile protocolaire est munie des niveaux (plans) de gestion suivants : le niveau de localisation, le niveau de synchronisation, le niveau de gestion de la topologie, le niveau de gestion de l'énergie, le niveau de gestion de la mobilité et le niveau de gestion des tâches. Le but d'un système en couches est de séparer le problème en différentes parties (les couches) selon leur niveau d'abstraction. Chaque couche du modèle communique avec une couche adjacente (celle du dessus ou celle du dessous). Chaque couche utilise ainsi les services des couches inférieures et en fournit à celle de niveau supérieur.

Cette pile prend en charge le problème de consommation d'énergie, intègre le traitement des données transmises dans les protocoles de routage, et facilite le travail coopératif entre les capteurs. La pile protocolaire [1] utilisée par le noeud puits ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par la figure 1.5.

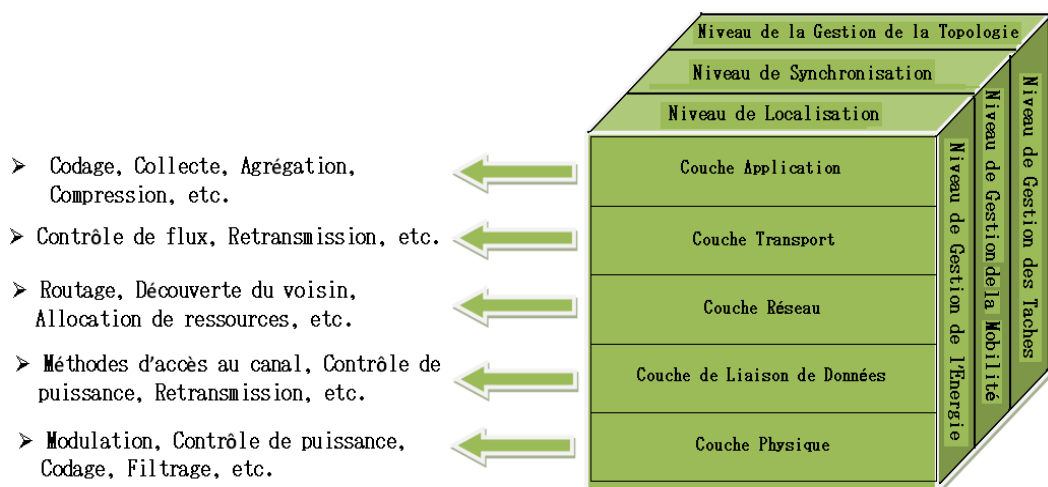


Figure 1.5 : La pile protocolaire de communication dans les RCSFs.

1. **La couche physique :** Cette couche s'occupe de la spécification du câblage, elle permet à la détection du signal, de moduler les données et les acheminer dans le media physique d'une manière robuste tout en choisissant les bonnes fréquences porteuses.
2. **La couche liaison de données :** Elle spécifie comment les données sont expédiées entre deux noeuds/routeurs dans une distance d'un saut.

En générale, cette couche elle est responsable du multiplexage du flux de données, de la détection et le verrouillage des trames de données, de l'accès au media physique et la détection et la correction (contrôle) d'erreurs intervenues sur la couche physique. De plus, elle établit une communication saut-par-saut entre les nœuds. C'est-à-dire, elle détermine les liens de communication entre eux dans une distance d'un seul saut. Ainsi qu'en assurant la liaison point à point et point à multipoint dans un réseau de communication.

De même, cette couche est composée de la couche de contrôle de liaison logique (LLC pour Logical Link Control) qui fournit une interface entre la couche liaison et la couche réseau en encapsulant les segments de messages de la couche réseau avec des informations d'entête additionnelles, et la couche de contrôle d'accès au médium (MAC pour Medium Access Control) qui contrôle la radio.

Comme l'environnement des réseaux de capteurs est bruyant et les noeuds peuvent être mobiles, la couche de liaison de données doit garantir une faible consommation d'énergie et minimiser les collisions entre les données diffusées par les noeuds voisins.

3. **La couche réseau :** Cette couche, elle s'occupe du routage de données fournies par la couche transport. Elle établit les routes entre les nœuds capteurs et le nœud puits et sélectionne le meilleur chemin en termes optimisant l'utilisation de l'énergie des capteurs, délai de transmission, débit, etc. Les protocoles de routage conçus pour les RCSF sont différents de ceux conçus pour les réseaux Ad-hoc puisque les RCSF sont différents selon plusieurs critères comme :

- L'absence d'adressage fixe des nœuds tout en utilisant un adressage Basé-attribut ;
- L'établissement des communications Multi-sauts ;
- L'établissement des routes liant plusieurs sources en une seule destination pour aggreger des donnees similaires, etc.

4. **La couche transport :** Cette couche est chargée du transport des données et la qualité de la transmission, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.

Dans les RCSFs, la fiabilité de transmission n'est pas majeure, ainsi que, les erreurs et les pertes sont tolérées. Par conséquent, un protocole de transport proche du protocole UDP et appelé UDP-Like (User Datagram Protocol Like) est utilisé. Cependant, comme le protocole de transport universel est TCP (Transmission Control Protocol), les RCSFs doivent donc posséder, lors d'une communication avec un réseau externe, une interface TCP-splitting pour vérifier la compatibilité entre ces deux réseaux communicants.

5. **La couche application :** Cette couche constitue l'ensemble des applications implémentées sur un réseau de capteurs. Ces applications doivent fournir des mécanismes permettant à l'utilisateur d'interagir avec le réseau de capteurs à travers différentes interfaces, et éventuellement, par l'intermédiaire d'un réseau étendu (par exemple ; Internet). Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels. Parmi les protocoles d'application, nous citons : SMP (Sensor Management Protocol) et TADAP (Task Assignment and Data Advertisement Protocol). Quant aux niveaux (plans) intégrés dans la pile protocolaire, ils ont les fonctions suivantes :

5.1. Le niveau de gestion d'énergie : Un noeud de capteur sans fil, nécessite seulement une source d'énergie limitée ($< 0.5 \text{ Ah}$, 1.2 V). La vie du noeud montre, une dépendance forte à l'égard de la vie de la batterie. Alors les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs. Dès lors, un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un noeud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués.

De plus, quand un noeud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs voisins pour les informer qu'il ne peut pas participer aux tâches de routage, et de cette façon il conserve l'énergie restante aux fonctionnalités de captage.

5.2. Le niveau de gestion de mobilité : Ce niveau permet de détecter et enregistrer tous les mouvements des noeuds capteurs, de manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final, et maintenir une image récente sur la localisation des noeuds pendant la phase de routage. Cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie.

5.3. Le niveau de gestion des tâches : Lors d'une opération de captage dans une région donnée, les noeuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme. Cela dépend essentiellement de la nature du capteur, de son niveau d'énergie et de la région dans laquelle il a été déployé.

Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents noeuds du réseau afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau.

1.14.2 Les standards de communication pour les RCSFs

Actuellement, une large gamme de plate-forme de micro-capteurs est commercialisée, mais la normalisation pourrait encore modifier les choses. Leurs architectures et leurs tailles différentes selon les types d'applications auxquelles elles sont destinées. Les groupes de travail qui se chargent de cette normalisation proviennent de l'IEEE aux États-Unis et de l'ETSI en Europe [47, 48].

Il y a une multitude de normes sans fil comme le Wi-Fi (le standard IEEE 802.11) et le Wi-Max (le standard IEEE 802.16) qui s'adressent au transport des données à haut débit. Certains dispositifs comme les capteurs n'ont pas besoin d'une largeur de bande très élevée, mais plutôt d'un temps de latence faible ainsi qu'une consommation d'énergie très basse, pour une longue durée de vie sur batterie et un grand nombre de dispositifs. D'où la nécessité de concevoir d'autres normes sans fil capables de répondre à ces exigences.

Parmi les standards les plus aptes à être exploités dans les réseaux de capteurs sans-fil se retrouvent les standards Bluetooth et ZigBee présentés ci-après.

1. **Le Bluetooth :** Le Bluetooth est un standard de communication sans fil basé sous la norme IEEE 802.15.1 [46], il utilise une technologie radio courte distance destinée à simplifier les connexions entre les appareils électroniques compatibles. Il représente l'équivalent de l'USB mais sans fil et sert donc à relier des périphériques avec un ordinateur ou d'autres périphériques (imprimantes, scanners, claviers, souris, téléphones portables, PDA, ...). Le succès de la technologie Bluetooth l'a amené à être utilisée dans le cadre des LAN (Local Area Network) sans fil.

L'avantage du Bluetooth par rapport au Wi-Fi, qui offre apparemment de meilleures performances, se trouve au niveau de la consommation. En effet, la connexion sans fil est surtout utilisée pour les appareils mobiles, et donc n'étant pas directement reliés au secteur. Par conséquent, la technologie Bluetooth a une plus faible consommation que le Wi-Fi.

Le second avantage est le prix attractif de cette technologie grâce à son faible coût de réalisation des puces. Cependant, cette faible consommation d'énergie ne répond pas encore à des exigences des capteurs, alors en plus de cette consommation d'énergie, la technologie Bluetooth ne peut donc pas être utilisée par des capteurs qui sont alimentés par une batterie et qui idéalement devraient fonctionner durant plusieurs années, et comme il souffre aussi d'un problème de passage à l'échelle.

2. **le ZigBee :** Beaucoup moins connue que Bluetooth, ZigBee est le nom d'une suite de protocoles de hauts niveaux [49] basée sur le standard IEEE 802.15.4 [50] pour les réseaux personnels sans fil (Wireless Personal Area Network : WPAN).

La technologie ZigBee a pour but la communication à courte distance telle que le propose déjà la technologie Bluetooth, tout en étant moins chère et plus simple. Les

noeuds sont conçus pour fonctionner plusieurs mois (jusqu'à deux ans) en autonomie complète grâce à une simple pile alcaline de 1,5 V.

Sa très faible consommation électrique et ses coûts de production très bas en font une candidate idéale pour les RCSFs. Le petit débit qu'il offre (250 Kbps théorique contre 1 Mbps pour Bluetooth), n'est pas vraiment un handicap pour un réseau de capteurs puisque la taille des paquets échangés n'est pas vraiment importante [51].

1.14.3 La topologie d'un RCSF

Il existe plusieurs topologies pour les réseaux à communication radio. Nous discutons ci-dessous des topologies applicables aux réseaux de capteurs [52, 53].

1. **La topologie en étoile** : Dans cette topologie, une station de base (puits) peut envoyer et/ou recevoir un message via un certain nombre de noeuds. Ces noeuds peuvent seulement envoyer ou recevoir un message de l'unique station de base, ils ne peuvent pas échanger des messages entre eux.

✓ **Avantage de cette topologie** : Est sa simplicité et faible consommation d'énergie des noeuds, moindre latence de communication entre les noeuds et la station de base ;

✓ **Inconvénient de cette topologie** : Est que la station de base doit être dans la même portée de transmission que les autres noeuds. En plus elle n'est pas robuste, car la station de base est vulnérable, car tout le réseau est géré par un seul noeud .

2. **La topologie en grille (Mesh Network)** : Dans ce cas dit communication Multi-Sauts, tout noeud peut échanger avec n'importe quel autre noeud du réseau (s'il est à portée de transmission). Un noeud voulant transmettre un message à un autre noeud hors de sa portée de transmission, peut utiliser un noeud intermédiaire pour envoyer son message au noeud destinataire.

✓ **Avantage de cette topologie** : L'avantage de cette Topologie est, la possibilité de passer à l'échelle du réseau, avec redondance et tolérance aux fautes ;

✓ **Inconvénient de cette topologie** : Une consommation d'énergie plus importante est induite par la communication Multi-Sauts. Une latence est créée par le passage des messages des noeuds par plusieurs autres avant d'arriver à la station de base.

3. **La topologie en hybride** : Une topologie hybride entre celle en étoile et en grille fournit des communications réseau robustes et diverses, en assurant la minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Dans ce type de topologie, les noeuds capteurs à faible puissance ne routent pas les messages, mais, il y a d'autres noeuds qui ont la possibilité de faire le routage des messages. En général, ces noeuds ont une puissance élevée.



Figure 1.6 : Les topologies d'un réseau de capteurs sans fil.

1.15 Conclusion

LES réseaux de capteurs restent une nouvelle technologie peu accessible au grand public. Elle est principalement répandue dans les laboratoires de recherches. Des progrès sont encore à réaliser dans ce domaine. Néanmoins, ils correspondent à une certaine vision du futur et permettront des améliorations dans d'innombrables domaines de la vie quotidienne.

La forte croissance des réseaux de capteurs a été accompagnée de nouveaux défis liés à leurs capacités physiques et énergétiques. En effet, à cause de leurs sources limitées en énergie et de leur faible puissance d'émission, les perturbations du canal radio affectent gravement les performances de ce type de réseaux.

Ce chapitre présente un état de l'art sur les RCSFs, et nous avons vu l'architecture physique d'un RCSF, la classification des RCSFs en catégories basées sur plusieurs critères, et les concepts généraux liés aux RCSFs. Parmi ces concepts nous avons identifié les contraintes de conception d'un RCSFs comme par exemple, la contrainte de consommation d'énergie qu'est un facteur à prendre toujours en considération. Puisqu'une grande partie de cette ressource critique est utilisée pendant la communication, plusieurs protocoles de communication en particulier ceux relatifs à l'acheminement de données ont été proposés afin de minimiser considérablement la dissipation de l'énergie. Ainsi que, les principaux services des RCSFs, et les caractéristiques de déploiement rapide des RCSFs créent de nouveaux domaines d'application pour le captage à distance.

En fin, un point sur les protocoles de communication sans fil dont Zigbee a été aussi abordé. La compréhension de ces concepts est nécessaire pour les concepteurs des protocoles et applications destinés aux réseaux de capteurs sans fil.

Chapitre 2

La localisation dans les réseaux de capteurs sans fils

2.1 Introduction

LE terme localisation est utilisé pour faire référence à un système permettant de déterminer l'emplacement d'un objet. La localisation dans les réseaux de capteurs pose néanmoins plusieurs problématiques en raison de la quasi absence de tout dispositif d'auto-positionnement. Comme les capteurs sont lâchés aléatoirement, dans ce cas, les noeuds doivent eux mêmes, au travers de techniques de coopération entre eux, déterminer ou définir leurs positions physiques respectives, pour pouvoir délivrer une information complète aux administrateurs.[54]

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art de la localisation dans les réseaux sans fil, l'objectif de la localisation dans les RCSFs déployés de manière aléatoire consiste à déterminer les coordonnées physiques ou géographiques d'un groupe de noeuds capteurs, ainsi que les caractéristiques de localisation qui nécessite de connaître la position d'ancres, et nous introduisons la problématique et le processus de localisation dans les RCSFs. Il est donc nécessaire de localiser, avec la meilleure précision possible, cette problématique, malgré les nombreux travaux de recherche qui s'y étaient attachés, reste une problématique ouverte.

Une nouvelle classification des approches de localisation dans les RCSFs est fondée sur l'utilisation d'une ancre mobile au lieu de plusieurs ancres statiques équipés par un système GPS. La nouveauté de notre approche réside dans la définition d'une trajectoire prédéfinie couplée à un algorithme de très faible complexité.

Nous pouvons distinguer deux types d'approches de localisation, qui sont : approches directe, et l'approche indirecte, et nous terminons ce chapitre par une conclusion.

2.2 Objectif de la localisation dans les RCSFs

L'objectif de la localisation dans les réseaux de capteurs déployés de manière aléatoire consiste à déterminer les coordonnées physiques ou géographiques d'un groupe de noeuds capteurs. Ces coordonnées peuvent être globales, c'est à dire qu'elles sont alignées avec un système extérieur comme le système GPS (Global Positioning System) par exemple, ou bien relatives.[55]

- Le premier cas, signifie qu'elles forment une transformation rigide (rotation, réflexion, translation) des coordonnées du système global ;
- Dans le deuxième cas, on n'a pas besoin de la position des noeuds pour fonctionner, une carte relative est suffisante.

Les méthodes qui créent une carte relative des coordonnées sans recours aux ancres sont appelées **Anchor-free** [56]. Par contre d'autres méthodes ne fonctionnent pas sans connaître la position d'un certain nombre d'ancres à priori, sont appelées **Anchor-based**[57, 58].

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

La connaissance des positions des capteurs dans l'environnement surveillé est souvent indispensable pour une grande majorité des applications (militaires, suivis des animaux, etc.), afin de pouvoir déterminer l'origine des événements détectés. < Où ? > est la question qui suit immédiatement la détection d'un événement (par exemple, où est le feu?).

En outre, la localisation peut être utilisée dans les protocoles de routage géographique dans les réseaux à grande échelle, en transmettant les données seulement dans la direction de la destination.

2.3 Caractérisations des méthodes de localisation

2.3.1 Nécessité de connaître la position d'ancres

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

Et donc, le fait que la méthode de localisation requiert ou non de connaître la position d'un certain nombre d'ancres est une caractéristique importante de la méthode.

1. **Les méthodes anchor-based** : Sont celles qui ne fonctionnent pas sans connaître la position d'un certain nombre d'ancres à priori ;
2. **Les méthodes anchor-free** : Sont celles qui n'ont besoin de la position d'aucun noeud pour fonctionner ; elles créent donc une carte relative du réseau. Par relative, nous entendons une carte qui est à une translation, une rotation orthogonale, une réflexion et une dilatation près de la "vraie" carte. Autrement dit, c'est une carte qui conserve les rapports entre les distances entre tous les points.

2.4 Problématique de la localisation dans les RCSFs

De la problématique de la localisation découle trois problèmes sous-jacents. Les deux premiers sont directement liés au matériel utilisé (définition d'un système de coordonnées et estimation des distances), tandis que le troisième concerne les techniques logicielles utilisées.

1. **Définition d'un système de coordonnées (un repère)** : En connaissant les positions de quelques noeuds du réseau (appelés ancres ou $\prec$ beacons $\succ$) dans un certain système de coordonnées et les positions relatives des autres noeuds par rapport à ces ancres, il est possible au travers d'un $\prec$ mapping $\succ$ de retrouver les positions absolues des noeuds dans le même système. Toute la question demeure de bien $\prec$ sélectionner $\succ$ les points repères (les ancres).
2. **Estimation des distances** : Ce procédé est fortement dépendant du matériel de communication utilisé. En d'autre terme, en collectant des indicateurs de la qualité des communications, les différents noeuds peuvent estimer les distances les séparant les uns des autres.
3. **Algorithme de localisation** : Les algorithmes de localisation sont utilisés à fin de calculer les positions finales en se basant sur d'une part les positions des ancres et d'autre part sur les estimations inter-noeuds.

2.5 Processus de localisation dans les RCSFs

Le processus de localisation dans les réseaux de capteurs de la façon la plus générale possible est illustré dans la figure 2.1. On peut remarquer qu'il y a des parties noires et des parties grises. Les parties noires sont communes à toutes les méthodes de localisation. Les parties grises en revanche dépendent des différentes méthodes de localisation utilisées.

D'une manière générale, ce processus consiste à définir un repère de coordonnées, une technique d'estimation des distances inter-noeuds et un algorithme pour la dérivation des positions.

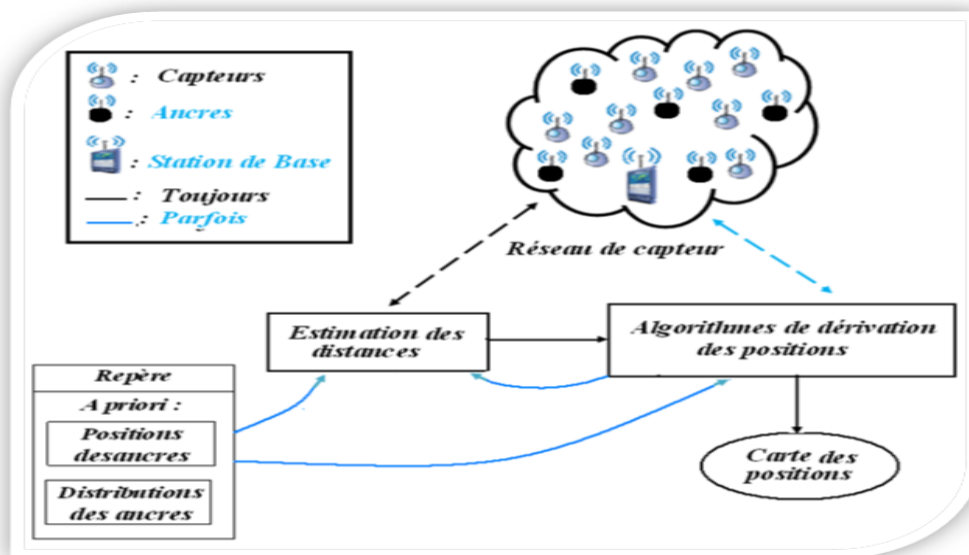


Figure 2.1 : Une vue du processus de localisation dans un RCSFs.

2.6 La localisation à l'aide d'une ancre (beacon)

2.6.1 La localisation à l'aide des ancres statiques

La localisation dans les réseaux de capteurs dépend de plusieurs dispositifs matériels. Cette dépendance se relève à l'utilisation des ancres (beacons), et à l'estimation des distances entre les noeuds. Dans ce qui suit, nous présentons la définition d'une ancre, son mode d'utilisation, ainsi que son inconvénient, et nous introduisons également les différentes techniques d'estimation de la distance.

2.6.2 Définition des ancrs statiques

Les ancrs, souvent appelées aussi beacons sont au préalable nécessaires pour localiser les noeuds d'un réseau dans un système de coordonnées global. Les ancrs sont simplement des noeuds ordinaires qui connaissent leurs coordonnées à priori. Cette connaissance pourrait être difficilement codée, ou bien facilement acquise par un certain matériel supplémentaire comme un récepteur GPS. Au minimum, trois ancrs non-colinéaires sont nécessaires pour définir un système de coordonnées en deux dimensions.

2.6.3 Mode d'utilisation des ancrs statiques

Les ancrs peuvent être utilisées de plusieurs façons. Certains algorithmes de localisation [57] trouvent une carte arbitraire relative pour les coordonnées des noeuds, puis ils utilisent les ancrs pour déterminer une transformation rigide (rotation, réflexion, translation) des coordonnées relatives vers les coordonnées globales. D'autres algorithmes [58], partant des positions des ancrs, calculent les positions des noeuds non-ancrs dans un système global.

Le placement des ancrs peut souvent avoir un impact significatif sur la localisation. On a constaté que la précision de la localisation s'améliore si les ancrs forment un polygone convexe autour du réseau [59]. De plus, d'autres ancrs supplémentaires placées au centre du réseau peut être également utile.

➤ **Inconvénient de l'utilisation des ancrs statiques :** L'utilisation des ancrs permet de grandement simplifier la tâche d'attribuer les coordonnées aux noeuds ordinaires. Par contre, elle présente des inconvénients inhérents. Les récepteurs GPS sont d'une part chers et d'autre part ne sont pas utilisables pour des applications à l'intérieur. Ils peuvent également être obstrués par de grands immeubles ou d'autres obstacles environnementaux.

En outre, les récepteurs GPS consomment aussi une quantité non négligeable de l'énergie de la batterie, qui peut être un problème pour le pouvoir énergétique limité des noeuds. Une alternative au GPS est la pré-programmation des noeuds avec leurs positions ou bien l'emplacement manuel. En revanche, ceci peut être non pratique (par exemple lors du déploiement de 10000 noeuds avec 500 ancrs), ou même impossible (par exemple lors du déploiement à partir d'un avion).

Pour pallier à certains de ses inconvénients, des travaux dans la littérature ont proposé l'utilisation d'une seule ancre mais cette fois ci il s'agit d'une ancre mobile à la place de plusieurs fixes.

2.6.4 La localisation à l'aide d'une seule ancre mobile

Le grand nombre des ancres nécessaires, leur coût, leur faible précision et leur forte consommation d'énergie, motivent l'utilisation d'une seule ancre mobile. Au lieu d'avoir plusieurs ancres statiques, une seule mobile est déployée avec les noeuds, puis elle traverse la zone de surveillance en communiquant avec les autres noeuds afin de les aider à s'auto-localiser comme montre la figure 2.2. L'ancre mobile diffuse des informations tout au long de sa trajectoire. Elle peut être un opérateur humain, un robot déployé avec le réseau de capteurs, ou dans le cas d'un déploiement d'un avion, l'avion lui-même.

- **Inconvénient de l'utilisation d'une seule ancre mobile :** Le principal inconvénient de l'utilisation d'une seule ancre mobile est cependant l'absence d'une trajectoire bien définie, ainsi que la détermination des instants durant lesquels l'ancre va diffuser les informations. Notons que ce problème est très difficile car les positions des autres noeuds ne sont pas connues à priori.

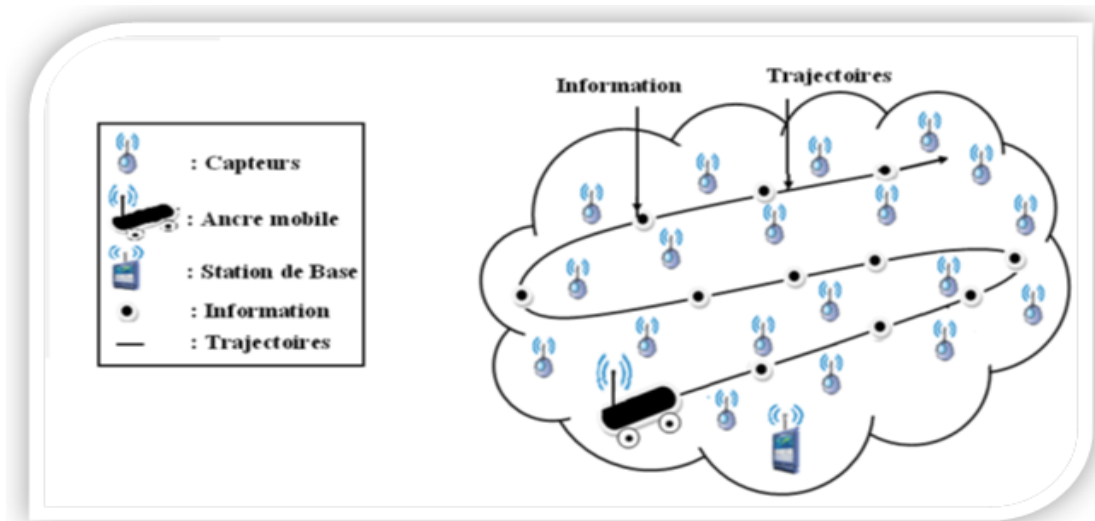


Figure 2.2 : Une seule ancre mobile pour aider les noeuds à s'auto-localiser.

2.7 Propriétés de localisation dans les RCSFs

La localisation peut être définie comme la position d'un objet ou d'une personne dans un repère. Un système de localisation doit avoir les propriétés suivantes [61, 62, 63, 64] :

1. Une technique d'estimation de position - trilatération ou triangulation ;
2. Un repère qui permet d'obtenir des positions et qui les organise de façon cohérente.

Trois types de position sont observés :

- Les positions absolues renseignent sur la position réelle de l'objet sur le globe terrestre (latitude, et longitude) ou dans l'espace (latitude, longitude, et altitude) ;

- Les positions relatives indiquent juste une direction par rapport à un voisinage donné : à droite, au bout de la rue par exemple ;
 - Les positions symboliques designent par exemple une salle, un espace particulier.
3. Une précision de position : une position peut aller d'un point dans le cas d'une grande précision à une surface (ou volume) si la précision de position est moins importante ;
 4. Une architecture particulière : un système de positionnement en intérieur - dans un bâtiment par exemple - ne possède pas les mêmes contraintes qu'un système de localisation d'extérieur ;
 5. Un coût matériel, infrastructure, etc.

2.8 Classification des approches de localisation dans les RCSFs

Il existe de nombreuses approches, aussi appelées des stratégies pour résoudre le problème de la localisation dans les RCSFs, et chaque approche a ses avantages et ses inconvénients. Nous pouvons distinguer deux types d'approches de localisation, sont les suivantes [60] :

1. L'approche directe, connues également sous le nom de localisation absolue ;
2. L'approche indirecte, est également connues sous le nom de localisation relative.

Les localisations absolues détermineront de manière précise (exacte) les coordonnées du noeud dans le réseau tandis que les localisations relatives, ou grossières, spécifieront une surface ou des coordonnées virtuelles, etc.

2.8.1 L'approche directe

L'approches directe peut même être classifiée en deux types de techniques :

1. **Technique de configuration manuelle** : Cette technique de configuration manuelle est très encombrante et couteuse. Elle n'est ni pratique ni adaptée pour les réseaux de capteurs à grande échelle et en particulier, ne s'adapte pas bien pour les réseaux de capteurs mobiles.
2. **Technique de localisation basée sur le GPS** : Cette technique de localisation basée sur le GPS, permet de résoudre en théorie le problème de localisation de chaque noeud du réseau, et s'adapte bien pour les noeuds mobiles. Toutefois, équiper chacun des capteurs d'un récepteur GPS constitue souvent une solution irréalisable en pratique, à cause du coût prohibitif d'un tel équipement pour un réseau constitué de millier de capteurs, de la réserve énergétique limitée des capteurs et du mauvais fonctionnement de cette technologie en intérieur.

2.8.2 L'approche indirecte

L'approche indirecte est également connue sous le nom de localisation relative, dans laquelle les positions des noeuds sont dérivées par rapport aux positions d'autres noeuds dans leur proximité. Les approches indirectes de localisation ont été introduites pour surpasser les inconvénients des techniques de localisation basées sur le GPS.

Dans ces techniques de localisation, quelques noeuds capteurs nommés beacons ou ancres sont équipés de récepteurs GPS et servent de repères pour les autres noeuds ordinaires qui vont calculer leur position selon des méthodes appropriées. Ces approches s'avèrent moins coûteuses que les approches directes.

En fin, le processus de localisation pour l'approches indirecte peut même être classifiée en deux types de techniques de mesures, citées ci-dessous :

1. Les méthodes basées mesures (RANGE-BASED) ;
2. Les méthodes libres de mesure (RANGE-FREE).

2.9 Conclusion

CE chapitre traite de la problématique de la localisation dans les réseaux de capteurs. Pour pouvoir localiser les noeuds (déployés aléatoirement) dans un réseau de capteurs statiques, nous avons proposé ou introduit une approche fondée sur l'utilisation la mobilité d'une ancre mobile pour contribuer à la localisation de capteurs statiques.

Une stratégie de déplacement est alors définie afin d'aider à la localisation des capteurs. L'originalité de cete approche réside dans la définition d'une trajectoire prédéfinie couplée à un algorithme de très faible complexité, afin de réduire le coût énergétique de cette phase de localisation.

L'ancre mobile suit une trajectoire (de Hilbert par exemple) en diffusant des informations de localisation. Les noeuds, recevant ces informations, exécutent un algorithme de très faible complexité pour trouver leurs positions (ou s'auto-localiser). Cette méthodes a de nombreux avantages en termes d'économie d'énergie et de précision de localisation.

Chapitre 3

Méthodes d'estimation optimales de la localisation des noeuds dans les réseaux de capteurs sans fils

3.1 Introduction

PLUSIEURS méthodes de localisation sont disponibles. La première et la plus développée est l'utilisation du GPS (Global Positioning System). Cette méthode n'est pas applicable à l'ensemble du réseau de capteurs, car elle est bien trop coûteuse du point de vue financier. En outre, du point de vue énergétique les récepteurs GPS consomment aussi une quantité non négligeable de l'énergie de la batterie, qui peut être un problème pour le pouvoir énergétique limité des noeuds.

Pour réduire ce coût, on a proposé d'autres méthodes qui consistent à équiper une partie des capteurs d'un module GPS, permettant de se localiser dans l'espace grâce aux coordonnées terrestres dans un plan bi-dimensionnel (longitude et latitude) ou tri-dimensionnel (latitude, longitude, altitude). Une fois leurs coordonnées absolues récupérées, ces noeuds émettent leur position autour d'eux, qui servira ensuite de repères aux autres (ceux n'étant pas équipés de module GPS) pour qu'ils puissent à leur tour se localiser.

Une deuxième méthode de localisation consiste à déployer un seul noeud assisté par une ancre mobile au lieu de plusieurs équipés par un GPS. Une fois déployé, le mobile traverse toute la zone en diffusant des informations autour de lui pour aider les noeuds du réseau à trouver leurs positions. Cette méthode a de nombreux avantages en termes d'économie d'énergie et de précision de localisation.

Dans ce chapitre, nous présentons les méthodes de localisation géométriques dont les quelles les deux techniques de base pour la localisation sont la trilatération et la triangulation. Elles reposent sur des propriétés très simples et bien connues des triangles. Et un bilan et synthèse sur les méthodes de calcul de la position [66].

La plupart des systèmes de localisation pour les RCSFs reposent sur au moins une de ces deux méthodes. Afin de calculer les distances ou les angles, plusieurs paramètres des communications sans fil sont utilisés. Le premier paramètre est le temps de propagation des signaux, et lorsque les entités sont parfaitement synchronisées, ce procédé s'appelle Time Of Arrival (TOA). En revanche, lorsqu'il n'y a pas de synchronisation forte, on parle de Time Difference Of Arrival (TDOA) et il s'agit alors d'effectuer le calcul sur plusieurs paquets. Le Global Positioning System (GPS) repose sur cette technique. Un autre paramètre des communications sans fil sur lequel on peut s'appuyer pour la localisation est l'angle d'incidence ou Angle Of Arrival (AOA) [67]. Le dernier paramètre utilisé pour calculer une position avec une trilatération est la puissance d'émission. En effet, la puissance de réception du signal ou Received Signal Strength (RSS) dépend de la puissance d'émission et de la distance. Une comparaison des méthodes d'estimation des distances/angles est considérée [68][69].

En fin d'autres familles de méthodes, ont pour références les méthodes HTRefine, SumDistMinMax, APS, APS_{AoA} partagent le même schéma d'exécution : chaque ancre diffuse sa position, les capteurs calculent alors une estimation des distances avec les ancres et enfin déduisent leurs positions. Et nous distinguons plusieurs façons d'implémenter le processus de localisation et ceci selon des méthodes centralisées distribuées, et nous terminons le chapitre par une conclusion.

3.2 Méthodes de localisation géométriques dans les RCSFs

Comme nous le avons vu dans l'introduction du chapitre 2, la localisation n'est pas une problématique récente. De fait, nous commencerons notre panorama par une description des méthodes fondamentales de détermination de la position puis nous passerons à des calculs ou des mesures plus modernes et directement liés au domaine de la localisation dans les réseaux de capteurs.

Quand un noeud capteur a suffisamment d'information de distances/angles et de positions (des amers : points de repères), il peut calculer sa position. Pour cela, plusieurs méthodes sont généralement utilisées pour la localisation d'un objet. Parmi ces méthodes : la multilatération, la trilatération, la triangulation, les approches probabilistes, le cadre englobant, la position centrale, et la méthode des hyperboles.

3.2.1 Méthode de trilatération

La trilatération est la méthode de localisation la plus basique et intuitive. Cette méthode calcule la position d'un noeud que l'on désire localiser par l'intersection de trois cercles. Pour une localisation en deux dimensions (2D) [70], un noeud a besoin de connaître la position de trois noeuds de référence (NR) $NR_1(x_1; y_1)$, $NR_2(x_2; y_2)$ et $NR_3(x_3; y_3)$ (des coordonnées spatiales de ces ancres) ainsi que des distances d_1 , d_2 et d_3 séparant le noeud à localiser par rapport à ces noeuds de référence.

La distance peut être estimée en utilisant l'une des méthodes décrites précédemment dans « Estimation de distance/angle », une méthode à base de mesure de temps d'arrivée (ToA), et une méthode à base de mesure de puissance du signal (RSSI). Un noeud de référence est un noeud ancre qui a ses coordonnées globales connues à priori. Ces coordonnées peuvent être pré-enregistrées ou obtenues à l'aide d'un dispositif externe comme le GPS.

La figure suivante illustre le principe de la localisation par trilatération. En effet, soient $(x_i; y_i)$ les coordonnées cartésiennes du $i^{\text{ème}}$ (NR_i) et $(x; y)$ les coordonnées du noeud à localiser (NC).

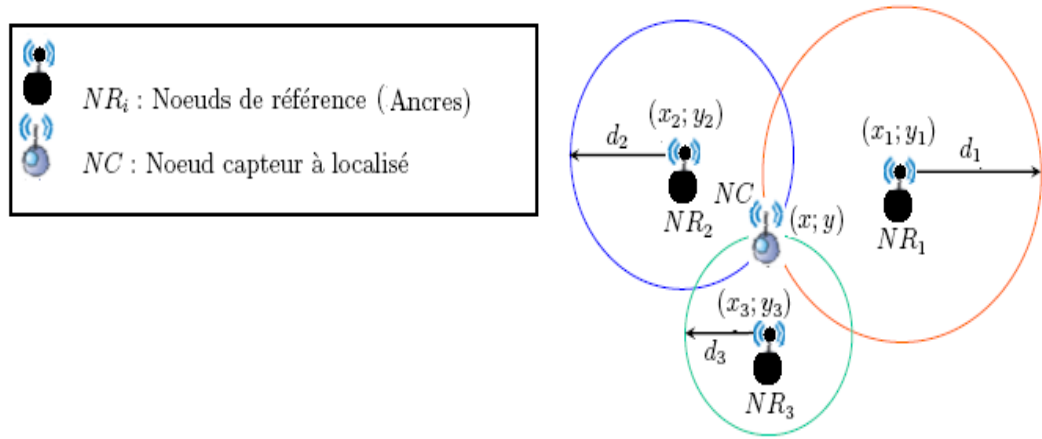


Figure 3.1 : Localisation par trilatération.

La position d'un noeud que l'on désire localiser est obtenue par le point d'intersection des trois cercles centrés aux positions des noeuds de référence $NR_1(x_1; y_1)$, $NR_2(x_2; y_2)$ et $NR_3(x_3; y_3)$ ayant respectivement les diamètres d_1 , d_2 et d_3 . Plus précisément, cette position peut être déterminée par la résolution du système d'équations suivant [70] :

$$\begin{cases} d_1^2 &= (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\ d_2^2 &= (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \\ d_3^2 &= (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \end{cases} \quad (3.1)$$

3.2.2 Méthode de triangulation

La triangulation ressemble à la trilatération, mais elle utilise les angles à la place des distances. La position peut être calculée à distance (centralisée au niveau des noeuds de référence) ou par les noeuds eux-mêmes (auto-localisation). Dans les deux cas, la position est calculée en utilisant les lois de la trigonométrie (cosinus et sinus) [72].

Pour une localisation à distance en deux dimensions (2-D), au moins deux noeuds de référence $NR_1(x_1; y_1)$, et $NR_2(x_2; y_2)$ estiment l'angle d'arrivée (AoA) des signaux du noeud à localiser $NC(x, y)$, et elles calculent la position du noeud qui n'est que l'intersection des deux droites qui partent des deux noeuds de référence avec les deux angles mesurés respectivement. La Figure 3.2-(A) illustre le principe de la localisation à distance. Ce type de triangulation est surtout utilisé dans les réseaux de téléphonie mobile. En utilisant les propriétés géométriques du triangle, il est possible de montrer que la position du noeud à localiser peut être obtenue comme suit [71] :

$$\begin{cases} d^2 &= d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2 \cdot \cos(\theta) \\ x &= x_1 + d_1 \cos(\theta_1) \\ y &= y_1 + d_1 \sin(\theta_1) \end{cases} \quad (3.2)$$

Contrairement à la trilatération, l'avantage de la triangulation est qu'elle ne nécessite que deux noeuds de référence (NR_1, NR_2) pour une localisation en deux dimensions (2D) [65].

Le point $NC(x, y)$ se retrouve à l'intersection des droites passant par les couples $(NR_1; NC)$ et $(NR_2; NC)$ (Figure 3.2-(A)). En définissant un nouveau repère dont l'origine est NR_1 et où $(NR_1; NR_2)$ se confond avec l'axe des ordonnées, le rapprochement des équations des droites conduit à l'expression (3.3) de la position de $NC(x, y)$.

$$NC(x; y) = NC \left(\frac{y_2}{\tan(\theta_1) + \tan(\theta_2)}; \frac{y_2 \cdot \tan(\theta_1)}{\tan(\theta_1) + \tan(\theta_2)} \right) \quad (3.3)$$

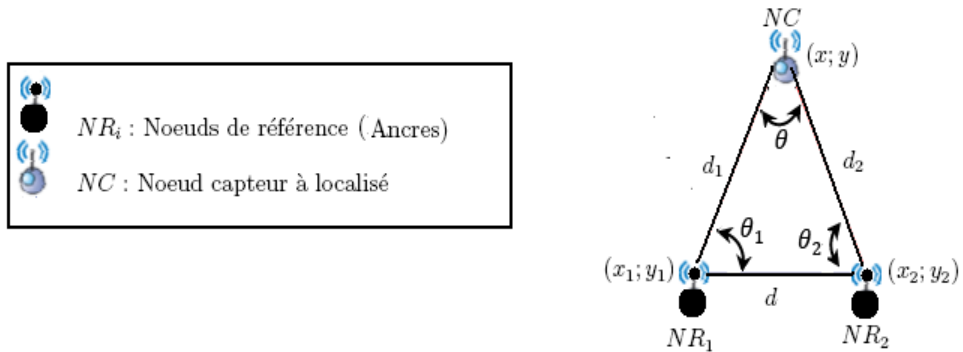


Figure 3.2-(A) : Localisation à distance par triangulation [61].

Cependant dans les RCSFs, le plus important est que chaque noeud calcule sa position lui-même (auto-localisation). Dans ce cas, au moins trois noeuds de référence (ancres) sont nécessaires $NR_1(x_1; y_1)$, $NR_2(x_2; y_2)$ et $NR_3(x_3; y_3)$. Le noeud non localisé $NC(x, y)$ estime ses angles avec chaque noeud de référence. En se basant sur les angles estimés et les positions des noeuds de référence (qui forment un triangle), le noeud à localiser calcule sa position en utilisant les lois de la trigonométrie. La Figure 3.2-(B) illustre le principe de l'auto-localisation en utilisant la triangulation. Cette technique est similaire à la trilatération. En effet, en se basant sur les angles d'arrivée (AoA), il est possible de déduire les distances vers les divers noeuds de référence.

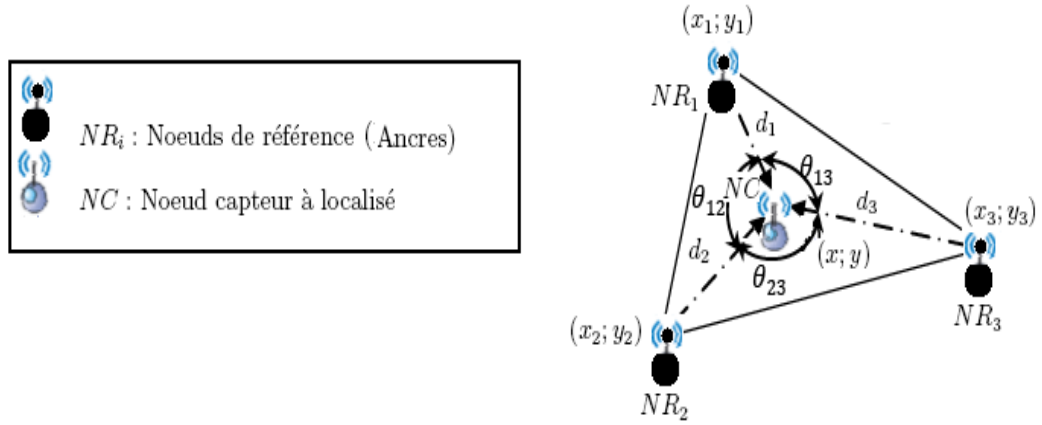


Figure 3.2-(B) : Auto-localisation par triangulation [75].

Pour le principe de localisation par triangulation en utilisant la loi de sinus, et le théorème d'Al-Kashi pour pouvoir positionner un noeud à partir de deux noeuds de référence.

Pour cela, soit un triangle NR_1, NR_2 , et NR_3 , dans le quel on utilise les notations usuelles exposées sur la Figure (3.2), d'une part θ_1, θ_2 , et θ_3 pour les angle, et d'autre part d_1, d_2 , et d_3 pour les cotés (distances) respectivement opposés à ces angles.



Figure 3.2 : Principe de localisation par triangulation.

Alors le théorème d'Al-Kashi stipule que [65] :

$$\text{Les formules du sinus : } \frac{d_1}{\sin(\theta_1)} = \frac{d_2}{\sin(\theta_2)} = \frac{d_3}{\sin(\theta_3)} \quad (3.4)$$

$$\text{Les formules du cosinus : } \begin{cases} d_3^2 &= d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2 \cdot \cos(\theta_3) \\ d_2^2 &= d_1^2 + d_3^2 - 2d_1d_3 \cdot \cos(\theta_2) \\ d_1^2 &= d_2^2 + d_3^2 - 2d_2d_3 \cdot \cos(\theta_1) \end{cases} \quad (3.5)$$

A partir des ces relations et de deux noeuds de référence, on peut obtenir la position d'un troisième noeud. Cet algorithme utilise donc au moins deux noeuds de référence mais nécessite la connaissance de plus d'informations liant les trois noeuds. Il est en effet nécessaire de connaître l'angle formé par le triangle issu des trois noeuds, mais les autres algorithmes n'utilisant que les distances.

3.2.3 Méthode de multilatération

La multi-latération a le même principe que la tri-latération, en utilisant plus que trois noeuds de référence (ancres). La multi-latération exploite la différence entre les instants d'arrivée du signal-TDOA pour calculer la position du noeud à localiser. La position d'un noeud que l'on désire localiser est calculée en connaissant les positions d'un certains ancres et les distances estimées de ce noeud à localiser aux différents ancres [73].

Soit une cible i , est le noeud que l'on désire localiser $NC_i(x_i; y_i)$, connaissant les positions $NR_j(x_j; y_j)$ de n noeuds de référence (ancres) ($1 \leq j \leq n$) ainsi que les distances d_{ij} , où d_{ij} représente la distance euclidienne entre le noeud à localiser NC_i et l'ancre NR_j . Ayant ces informations et pour calculer la position $NC_i(x_i; y_i)$ de la cible i nous formons le système suivant :

$$\begin{cases} d_{i1}^2 &= (x_1 - x_i)^2 + (y_1 - y_i)^2 \\ d_{i2}^2 &= (x_2 - x_i)^2 + (y_2 - y_i)^2 \\ d_{i3}^2 &= (x_3 - x_i)^2 + (y_3 - y_i)^2 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ d_{in}^2 &= (x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 \end{cases} \quad (3.6)$$

Ce système peut être linéarisé en soustrayant la dernière équation des $n - 1$ équations précédentes. En réordonnant les termes, nous obtenons un système d'équations linéaires. Ayant des erreurs dans les estimations de distances, il paraît qu'une solution exacte pour un tel système d'équations est presque impossible. La solution la plus proche de la solution exacte c'est au sens des moindres carrés. Cette solution est plus détaillée dans [73].

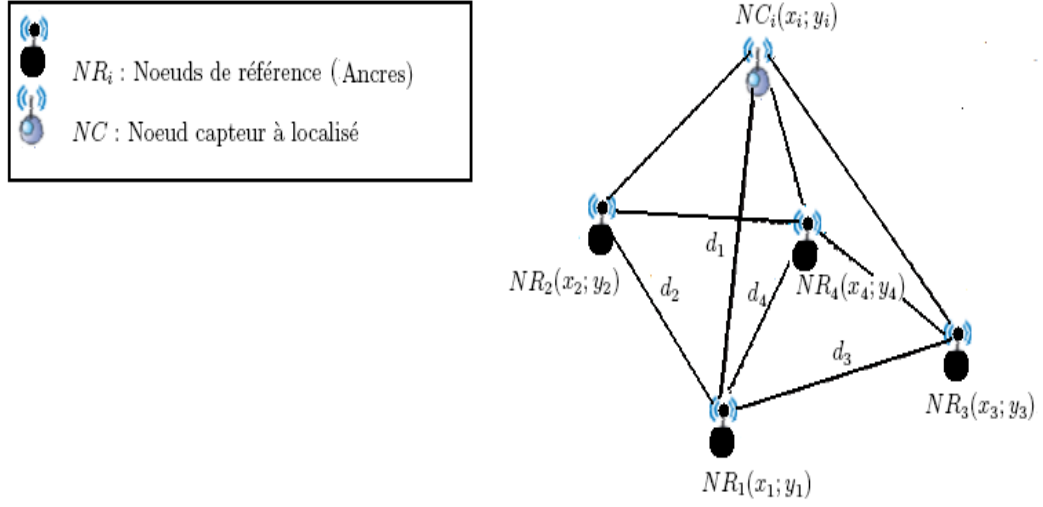


Figure 3.3 : Localisation par méthode de multi-latération.

3.2.4 Méthode des hyperboles

Cette méthode repose sur la différence entre les distances du noeud NC que l'on désire à localiser aux deux noeuds de référence NR_1 , et NR_2 comme indiqué dans la figure 2.11.



Figure 3.4 : Localisation par les hyperboles.

En effet, la différence entre les distances d_1 et d_2

$$\Delta d = d_{ij} = d_1 - d_2 = \sqrt{(x+d)^2 + y^2} - \sqrt{(x-d)^2 + y^2} \quad (3.7)$$

Permet, après quelques développement mathématiques, d'aboutir à l'équation d'une hyperbole à partir de laquelle la position du noeud que l'on cherche à localiser est déterminée [71] :

$$\frac{x^2}{\left(\frac{\Delta d^2}{4}\right)} - \frac{y^2}{\left(\frac{4d^2 - \Delta d^2}{4}\right)} = 1 \quad (3.8)$$

3.2.5 Méthode probabiliste

Les incertitudes dans les estimations de distance motivent l'apparition des approches probabilistes. Dans ces approches, le résultat de calcul de la position n'est pas un seul point, mais un ensemble de points avec leurs probabilités d'être la position réelle du noeud à localiser.

Un exemple d'une approche probabiliste est proposé dans [77]. Dans ce travail, l'erreur de distance est modélisée comme une variable aléatoire normale. Quand un noeud reçoit un paquet en provenance d'un noeud de référence (amer), il peut être localisé autour du noeud de référence, comme le montre la Figure 3.5-(A). La distance est estimée en utilisant l'indicateur de puissance du signal reçu (RSSI). Quand un deuxième paquet arrive en provenance d'un deuxième noeud de référence, le noeud calcule sa position comme le montre la Figure 3.5-(B). Quand une nouvelle information arrive d'un troisième noeud de référence, alors il est possible d'estimer la position du noeud comme le montre la Figure 3.5- (C).

Si une application a besoin d'une seule position (pas toutes les positions possibles), la position avec une grande probabilité est utilisée. L'inconvénient majeur de cette approche est qu'elle est coûteuse en puissance de calcul ainsi qu'en espace mémoire nécessaire pour stocker les informations. Dans l'article [77], il est démontré que si l'espace d'intérêt est une grille de $d \times d$, alors la complexité de la méthode est de $O(3d^2)$.

Une application possible de cette approche est d'envoyer toutes les informations collectées à partir de tous les noeuds vers un noeud central (avec plus de puissance et de mémoire) pour calculer les positions de tous les noeuds du réseau [78].

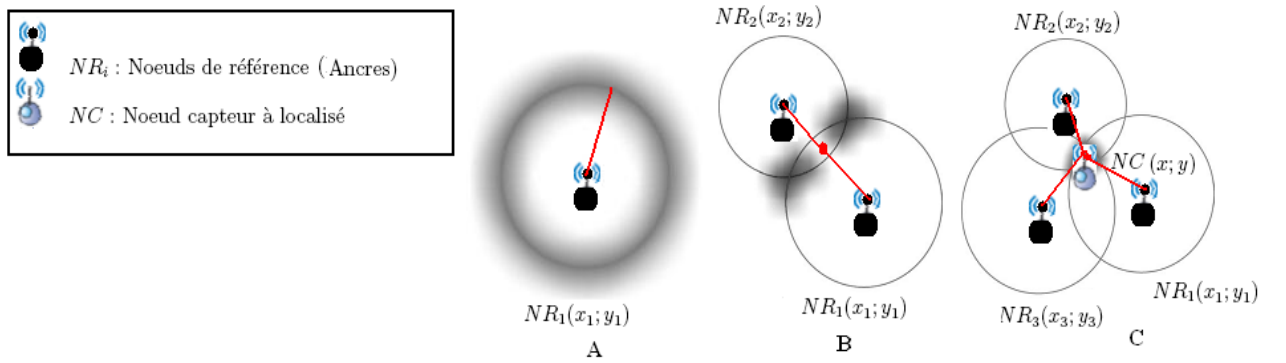


Figure 3.5 : Localisation par la méthode probabiliste [78].

3.2.6 Méthode du cadre englobant (Bounding Box)- BB

La méthode du cadre englobant (Bounding Box) [79] utilise des carrés à la place des cercles pour déterminer les positions possibles d'un noeud que l'on désire localiser $NC(x; y)$. Pour chaque noeud de référence (amer), un cadre (ou rectangle) englobant est défini comme le carré centré à la position du noeud de référence $NR_i(x_i; y_i)$ et qui a $2d_i$, comme longueur de côté (d_i est la distance estimée par rapport à un noeud non encore localisé) et avec comme coordonnées $(x_i - d_i; y_i - d_i)$ et $(x_i + d_i; y_i + d_i)$ pour les coins inférieur gauche et supérieur droit respectivement.

L'intersection de tous les cadres englobant donne les positions possibles du noeud à localiser $NC(x; y)$. Cette intersection peut être calculée facilement en prenant le maximum des coordonnées inférieures et le minimum des coordonnées supérieures [78].

$$(Max(x_i - d_i); Max(y_i - d_i)) \quad \text{et} \quad (Min(x_i + d_i); Min(y_i + d_i)) \quad (3.9)$$

La position finale du noeud à localiser est le centre du rectangle obtenu, et elle est calculée comme suit :

$$NC(x; y) = \left(\frac{Max(x_i - d_i) + Min(x_i + d_i)}{2}; \frac{Max(y_i - d_i) + Min(y_i + d_i)}{2} \right) \quad (3.10)$$

La Figure 3.6, illustre le principe du rectangle englobant.

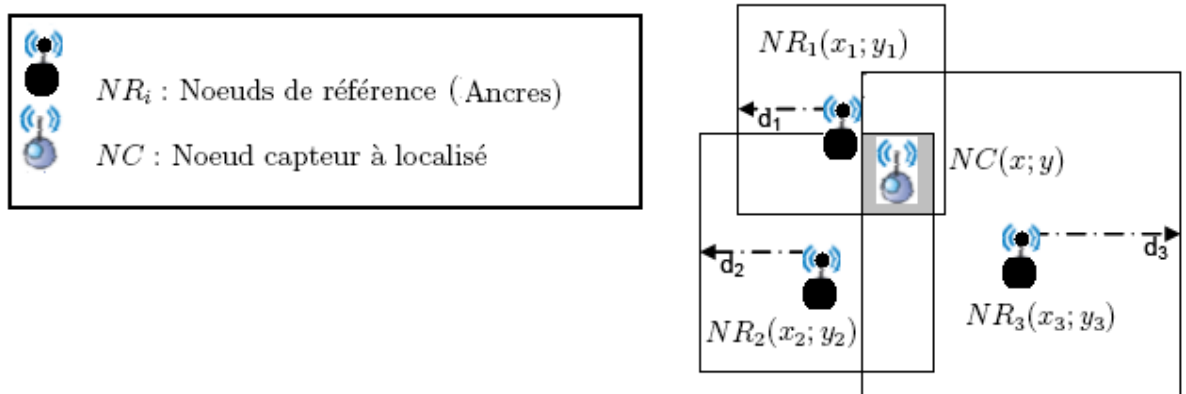


Figure 3.6 : Localisation par la méthode du cadre englobant.

La précision de cette méthode dépend fortement de la précision d'estimation des distances, par conséquent elle est meilleure quand les noeuds à localiser sont plus proches des ancrs. Cependant, cette méthode fonctionne mieux quand les noeuds sont extrêmement limités en ressources, puisqu'il est d'une complexité très simple.

3.2.7 Méthode de position centrale

En supposant que la position la plus probable pour un noeud que l'on désire localiser $NC(x; y)$ (non encore localisé) est le point central de tous les noeud de référence $NR_i(x_i; y_i)$ (amers), le calcul de la position du noeud à localiser peut être fait sans avoir besoin d'estimer les distances entre le noeud et les amers. Dans ce cas là, la position du noeud est calculée en utilisant la formule suivante [79][80] :

$$NC(x; y) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) \quad (3.11)$$

Avec n étant le nombre de noeuds de référence (d'amers). Cette méthode est la plus simple en termes de ressources de calcul et d'informations nécessaires : seulement $2n$ opérations flottantes sont nécessaires pour calculer la position du noeud que l'on cherche à localiser. Cependant les solutions obtenues sont imprécises, notamment lorsque le nombre de noeuds de référence est réduit [78].

3.3 Bilan et synthèse sur les méthodes de calcul de la position

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

Il n'y a pas de solution générale et idéale qui fonctionne pour tous les scénarios. Le choix de la méthode dépend des informations collectées et des ressources du processeur. Le Tableau 2.2 compare les principales caractéristiques des méthodes de calcul de la position présentées dans les paragraphes précédents [78].

Méthode	Nombre de références	Distance	Angle	Complexité temporelle)	Défis
Trilatération	$n_r = 3$	Oui	Non	$O(1)$	Sensible aux imprécisions des distances
Multilatération	$n_r \succeq 3$	Oui	Non	$O(n^3)$	Complexité du calcul
Triangulation	$n_r = 3$	Non	Oui	$O(1)$	Besoin de matériel supplémentaire
Probabiliste	$n_r \succeq 3$	Oui	Non	$O(3d^2)$ (taille de la grille)	Complexité du calcul et le volume mémoire nécessaire
Cadre englobant	$n_r \succeq 2$	Oui	Non	$O(n)$	Erreur de la position finale
Position centrale	$n_r \succeq 1$	/	/	$O(n)$	Erreur de la position finale

TABLE 3.1 – Comparaison des méthodes de calcul de la position

3.4 La localisation dans les réseaux de capteurs statiques

Le but de la localisation est d'attribuer une position exacte ou estimée à chacun des capteurs. De par les spécificités des réseaux de capteurs, chaque méthode doit assurer un critère essentiel : le passage à l'échelle. Les hypothèses faites par les méthodes de localisation sont nombreuses et variées. Souvent, il est supposé que certains capteurs connaissent leurs localisations géographiques. Ces capteurs sont alors appelés des ancres. Les modules de localisation (par exemple, le GPS ou Galileo) étant onéreux et consommateurs en énergie, ces méthodes chercheront à utiliser le moins d'ancres possibles.

Pour se passer de ces ancres ou, plus précisément, pour ne dépendre d'aucun système de coordonnées global, certaines solutions ([Simic et Sastry, 2001](#) ; [C. apkun et al., 2001](#) ; [Benbadis et al., 2005](#)) construisent un système de coordonnées « virtuelles » (différent du système terrestre). Elles ne nécessitent pas de module de localisation et attribuent aux capteurs des positions (coordonnées virtuelles) dans ce système. Ces méthodes ne sont pas utilisées pour la localisation dans le sens géographique du terme, mais plutôt pour l'identification ou l'adressage des capteurs. Ces positions sont alors utilisées dans des domaines tels que le routage.

D'autres solutions de natures différentes comme par exemple ([Bahl et Padmanabhan, 2000](#) ; [Priyantha et al., 2000](#) ; [Want et al., 1992](#)) nécessitent une infrastructure pré-installée tandis que les méthodes ([Bulusu et al., 2001](#) ; [Priyantha et al., 2005](#)) font intervenir des robots pour aider à la localisation. Ces méthodes sortent du cadre d'étude de notre travail, et c'est pourquoi elles ne seront pas considérées par la suite.

3.5 Méthodes de localisation s'appuyant sur des ancres

Parmi les méthodes de localisation dans les RCSFs s'appuyant sur des ancres, deux catégories se distinguent : les méthodes dites basées mesures et celles libres de mesure. La première concerne l'ensemble des méthodes qui utilisent les techniques de mesure : RSSI, AoA, ToA, TDoA, et d'autres décrites ci-après. A contrario, la seconde regroupe celles qui ne les utilisent pas.

3.5.1 Méthodes de localisation de mesures basées (RANGE-BASED)

Les méthodes basées mesures utilisent les technologies tels que : la RSSI, l'AoA, le ToA, la TDoA, et d'autres afin de mesurer les distances ou les angles entre deux capteurs voisins. Grâce à cette capacité de mesure de ces distances, un capteur pourra en suite, sous certaines conditions, obtenir ou dériver de ces distances sa position exacte. Autrement, une position estimée lui sera attribuée. Il existe plusieurs techniques qui sont développées pour les estimations des distances entre les noeuds voisins. Parmi lesquelles nous trouvons

celles qui sont basées sur les dispositifs radio sans fil de nos capteurs qui fournit deux indications sur le signal lors des transmissions.

Les méthodes basées mesures sont les plus répandues. Par exemple, les méthodes décrites dans (Barbeau et al., 2004; Savvides et al., 2001; Ji et Zha, 2004; Venkatraman et al., 2002; Moore et al., 2004), utilisent les mesures de distances entre deux capteurs voisins et les méthodes proposées dans (Niculescu et Nath, 2003a; Venkatraman et J. Caffery, 2003; P. et M.L., 2006) s'appuient sur les mesures d'angles. Les méthodes SumDistMin-Max (Savvides et al., 2002), APS (Niculescu et Nath, 2001) et APS avec AoA (Niculescu et Nath, 2003a), considèrent pour les deux premières des capteurs ayant la capacité de mesurer des distances et la troisième celle de mesurer des angles.

1. **Indicateur de Puissance du Signal Reçu-RSSI** : Le RSSI (Received Signal Strength Indication) c'est un indicateur de la puissance de signal au moment de la réception d'un message [85]. Dans les réseaux de capteurs sans fil, chaque capteur est équipé d'une radio. La question est de savoir comment utiliser la radio pour aider à localiser le réseau ?

En théorie, lorsqu'un équipement radio émet un signal, au fur et à mesure que celui-ci s'éloigne de la source, et l'intensité du signal radio diminue avec le carré de la distance de la source du signal. Ce phénomène s'explique par les interactions entre l'onde et le milieu de propagation. De ce fait, la technique de localisation basée sur le RSSI (Received Signal Strength Indication), un noeud récepteur à l'écoute d'une transmission radio doit être en mesure d'utiliser la puissance du signal reçu pour estimer sa distance de l'émetteur [66] [81].

Un certain nombre de travaux permettent d'estimer la puissance moyenne d'un signal pour une distance donnée, aussi bien que la variabilité du signal. Cette approche est détaillée dans [28, 29] et dans la proposition RADAR [81]. la mesure du signal RSSI est représentée par l'équation suivante [82] :

$$RSSI(d) = 10 \cdot \log_{10}(P_r(d) \times P_{ref}(d)) \quad (3.12)$$

- ✓ $P_r(d)$: Est la puissance du signal reçu ;
- ✓ $P_{ref}(d) = P_t(d)$: Est la puissance de référence (du signal transmis).

La figure (3.7) illustre la détermination de la distance séparant un capteur de trois voisins en utilisant la méthode RSSI.

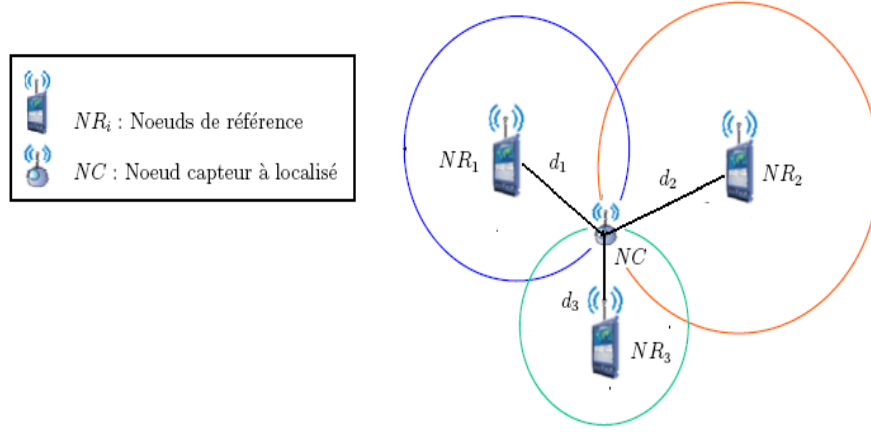


Figure 3.7 : La méthode RSSI.

- 1.1. **Puissance du signal radio** : Les mesures basées sur l'intensité du signal reçu estiment les distances entre les capteurs voisins à partir des mesures de l'intensité du signal reçu entre les deux capteurs. La plupart des appareils sans fil ont la capacité de mesurer l'intensité du signal reçu.

RSSI propose une solution élégante pour l'estimation des distances dans les réseaux de capteurs en utilisant un modèle de propagation des ondes radio ; puisque tous les noeuds possèdent leurs propres radios. Plusieurs modèles existent ; le plus simple utilise la formule (3.13) de Friis suivante [83] :

$$P_r(d) = P_t(d) \times G_t \times G_r \times \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^\alpha \times \left(\frac{1}{P_{loss}(d)} \right) \quad (3.13)$$

- ✓ $P_r(d)$: Puissance du signal reçue ;
- ✓ $P_t(d) = P_e(d)$: Puissance du signal transmis (d'émission) ;
- ✓ G_r : Gain numérique de l'antenne du récepteur ;
- ✓ $G_t = G_e$: Gain numérique de l'antenne du transmetteur (l'émetteur) ;
- ✓ $P_{loss}(d)$: Pertes de propagation en espace libre ;
- ✓ d : Distance entre l'émetteur et le récepteur ;
- ✓ α : Le coefficient d'affaiblissement du signal radio (dB) dépend du milieu de propagation, $2 \preceq \alpha \preceq 6$;
- ✓ $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{\text{Vitesse de la lumière } (m \cdot s^{-1})}{\text{Fréquence en MHz}}$: Longueur d'onde en mètres (m).

Les bilans de liaison utilisent généralement le modèle de l'équation (3.13) [83] pour prédire le niveau de puissance du signal reçue $P_r(d)$ à une certaine distance d (de l'émetteur au récepteur) connaissant la puissance du signal transmis (émise) $P_t(d)$. Le milieu traversé est caractérisé par les pertes de propagation en espace libre tel que [84] :

$$P_{loss}(d) = 20 \cdot \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (3.14)$$

Ces pertes sont liées à la distance d , et à la fréquence du signal dont la longueur d'onde λ intervient dans la formule.

Finalement, les gains des antennes d'émission et de réception utilisées, G_t et G_r , entrent en ligne de compte. Ce modèle fait donc l'hypothèse d'une répartition uniforme de l'énergie sur des spheres concentriques.

Dans le cas où le milieu traversé n'est pas caractérisé par les pertes de propagation en espace libre, le RSSI est l'inverse du carré de la distance d entre l'émetteur et le récepteur. Dénotons la puissance reçue par $P_r(d)$ dans [86] suivante :

$$P_r(d) = P_t(d) \times G_t \times G_r \times \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (\alpha = 2, \text{ par exemple}) \quad (3.15)$$

- 1.1.1 . **Propagation avec réflexion sur le sol ou Two Ray Ground reflection model :** Si l'équation de Friis est efficace dans le cadre des liaisons satellitaires, d'autres modèles sont nécessaires lorsqu'on s'intéresse à des communications proches du sol. Le Two Ray Ground Reflection model [87] considère que le signal suit deux chemins principaux (figure 3.8) pour arriver au récepteur. Le premier est direct et le second réfléchi par le sol.

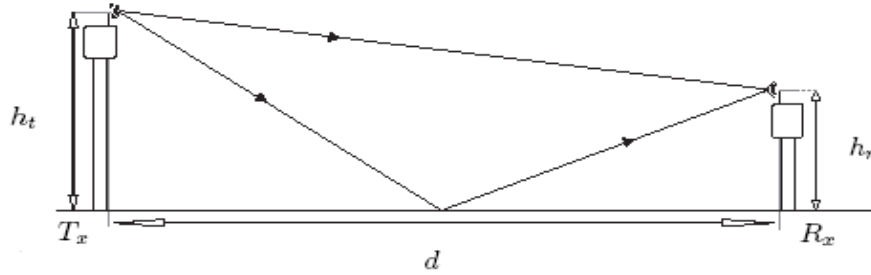


Figure 3.8 : Propagation avec une réflexion.

Le passage du modèle Free Space au modèle Two Ray ground reflection dépend de l'espacement d entre les antennes : entre 0 et la distance critique D_c (équation 3.17), le modèle de propagation en espace libre s'applique. Au-delà, le modèle avec réflexion au sol s'utilise. Ce dernier tient également compte de la hauteur des antennes de transmission ou d'émission h_t et de réception h_r . (équation 3.16).

$$P_r(d) = \left(\frac{P_t(d) \times G_t \times G_r}{P_{loss}(d)} \right) \times \left(\frac{h_t \times h_r}{d^2} \right)^2 \quad (3.16)$$

$$D_c = \left(\frac{4\pi \times h_t \times h_r}{\lambda} \right) \quad (3.17)$$

- 1.1.2. **Modèle de log-normal Shadowing :** Ce modèle [87] comporte deux parties :

1. **Le modèle d'atténuation :** Une distance de référence d_0 est définie et un niveau de puissance reçue lui est associé. La puissance reçue à une distance d quelconque est liée à ces informations par la relation (3.18) suivante :

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \left(\frac{d}{d_0} \right)^\beta \quad (3.18)$$

2. **La variation de la puissance à une distance donnée :** En un point donné, la puissance reçue varie au cours du temps. Une loi log-normale $X_{d\beta}$ a été retenue pour représenter cette variation. Le modèle complet s'écrit alors suivant l'équation (3.19) où β est un coefficient d'atténuation (perte) empirique.

L'intensité du signal sans fil reçu par un capteur d'un autre capteur est une fonction monotone décroissante de leur distance. Cette relation entre la puissance du signal reçu et la distance est modélisée par le modèle log normal suivant :

$$\left[\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} \right]_{d\beta} = -10\beta \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{d\beta} \quad (3.19)$$

- ✓ $[P_r(d_0)]_{d\beta}$: Est une puissance de référence en milli-watts $d\beta$ à une distance de référence d_0 de l'émetteur ;
- ✓ β : Est un coefficient d'atténuation ou l'exposant de perte de trajet qui mesure la vitesse à laquelle l'intensité du signal reçu diminue avec la distance ;
- ✓ $X_{d\beta}$: Une loi log-normale, est une variable aléatoire de moyenne de distribution gaussienne nulle avec l'écart-type σ et il représente l'effet aléatoire cause par l'ombrage.

Le coefficient d'atténuation ou l'exposant de perte β et l'écart-type σ sont dépendants de l'environnement. L'exposant de perte de trajet β est généralement supposé être une constante.

Si l'écriture du modèle de log-normal shadowing est plus complexe que celle des modèles précités, ses résultats sont plus proches de la réalité car la zone de portée n'est pas assimilée à un cercle mais à une surface dont les bornes varient au cours du temps, même sans déplacement de la source.

Un modèle très répandu existe pour représenter le RSSI en fonction de la distance, le modèle log-normal shadowing est représenté par l'équation (3.20) suivante [88] :

$$RSSI_d = P_t(d) - P_{loss}(d_0) - 10\beta \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (3.20)$$

- ✓ $P_t(d)$: Est la puissance de transmission ;
- ✓ $P_{loss}(d_0)$: Est la perte de signal pour une distance de référence d_0 ;
- ✓ β : Est l'exposant de la perte de signal.

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

- 1.2. **Nombre de sauts par radio(Radio hop count) :** Même si RSSI n'est pas trop précise pour de nombreuses applications, la radio peut encore être utilisée pour aider à la localisation. Le principe est que si deux noeuds peuvent communiquer par radio, alors la distance entre les deux est inférieure au rayon de communication R_c avec forte probabilité, où R_c est la portée de communication maximale de leurs radios, quelle que soit la force de leur signal. Ainsi, la simple donnée sur la connectivité peut être utile pour l'estimation de la distance.

Un moyen pour calculer les distances entre les noeuds est d'utiliser la méthode du nombre de sauts $\ll$ hope count $\gg$. L'information sur la connectivité locale fournie par la radio définit un graphe non pondéré, où les sommets sont les noeuds capteurs, et les arêtes représentent les liaisons radio directes entre ces noeuds. Le $\ll$ hope count $\gg$ S_{ij} entre les noeuds n_i et n_j est alors défini comme la longueur du chemin le plus court dans le graphe entre n_i et n_j . Naïvement, la distance entre n_i et n_j , d_{ij} est inférieure à $R_c \times S_{ij}$.

Il s'avère qu'une meilleure estimation peut être faite si on connaît le nombre de voisins locaux par noeud n_{local} . Ensuite, selon [89], il est possible de calculer une meilleure formule HopSize(Kleinrock and Silvester) (3.21) pour la distance couverte par un saut radio :

$$HopSize = d_{saut} = R_c \left(1 + e^{-n_{local}} - \int_{-1}^1 e^{\frac{n_{local}}{\pi} (\arccos t - t\sqrt{1-t^2})} dt \right) \quad (3.21)$$

Après, on aura $d_{ij} \approx S_{ij} \times d_{saut}$. Expérimentalement, l'équation (3.21) a été montrée tout à fait exacte au moment où n_{local} est aux alentours de 5. Par contre, lorsque n_{local} devient supérieur à 15, d_{saut} devient de plus en plus proche de R_c , et l'équation (2.9) devient de moins en moins utile. L'utilisation de cette méthode, provoque deux problèmes qui influencent sa précision, sont les suivants :

- Le premier est que la mesure de la distance est toujours une multiple intégrante de d_{saut} , et Cela conduit à une imprécision qui correspond à une erreur totale d'environ $0.5 \times R_c$ par mesure, qui peut être trop élevée pour certaines applications ;
- Le deuxième problème est les obstacles, ils empêchent les arêtes d'apparaître dans le graphe de connectivité qui autrement devraient être présents. De ce fait, S peut être sensiblement trop élevé.

- 1.3. **Les mesures de connectivité :** Les mesures de connectivité sont peut être les plus simples des mesures, associée à une technologie à très faible portée, cette information peut mener à une très grande précision au prix d'une forte densité de noeuds de référence. En effet dans les mesures de connectivité, un capteur mesure les capteurs qui sont dans sa portée de transmission. Ces mesures peuvent être interprétées comme des mesures de distance binaires. En d'autre terme, soit qu'un autre capteur se trouve dans la zone de couverture d'un capteur donné, ou qu'il soit en dehors de sa portée de transmission [60].

Un capteur est dans la portée de transmission d'un autre capteur définit une contrainte de proximité entre ces deux capteurs, ce qui peut être exploité pour la localisation. Dans sa forme la plus simple, quand un capteur non-ancre est voisin de trois ancrés, cela signifie que ce capteur est très proche de trois ancrés, ainsi de nombreux algorithmes peuvent utiliser le centre des trois ancrés comme l'endroit approximatif du capteur non-ancre, etc.

1.4. **Les mesures basées sur les clusters :** Une autre manière d'organisation hiérarchique d'un réseau est l'organisation clustérisée. Dans cette organisation, le réseau en entier est divisé en plusieurs clusters (groupes) selon une métrique spécifique ou une combinaison de métriques. Chaque cluster est géré par un cluster-head (chef de groupe) qui est élu par les membres du cluster. Le cluster-head joue le rôle d'agrégateur qui agrège les données des membres du cluster locaux et transmet le résultat de l'agrégat à la station de base (puits)[60].

2. **Mesure de la différence des temps d'arrivée -(TDoA) :** Le principe, de base de la technologie des TDoA (Time Difference of Arrival), consiste à estimer la différence des dates d'arrivée(ToA-Time of Arrival) d'un signal de capteur émetteur à deux capteurs récepteurs, respectivement et suppose également que la vitesse de propagation des signaux est connue. Cette technologie s'applique dans les cas suivants [66, 81] :

- Un capteur émetteur envoie des signaux de natures différentes (par exemple, l'ultrason, l'onde radio, etc.) à un capteur récepteur ;
- Un capteur récepteur reçoit des signaux d'une même nature d'au moins trois capteurs émetteurs ;
- Un capteur émetteur envoie un signal reçu par au moins trois capteurs récepteurs (dans ce dernier cas une vue globale des signaux sera connue).

Dans chacun des cas, les capteurs récepteurs mettent en corrélation leurs informations et en déduisent les distances qui les séparent des capteurs émetteurs. Il s'agit d'une simple résolution d'un système d'équations dont les distances sont les inconnues [65].

On note les coordonnées des deux capteurs récepteurs par X_i et X_j , et les coordonnées du capteur émetteur par X_t . La mesure TDoA $d_{ij} = \Delta t_{ij}$ est liée aux positions des deux capteurs récepteurs par :

$$d_{ij} = \Delta t_{ij} = (t_j - t_i) = \frac{1}{V_{prop}} \cdot (\|X_t - X_i\| - \|X_t - X_j\|) \quad (3.22)$$

- ✓ t_i et t_j : Sont respectivement les temps d'arrivée du signal du capteur émetteur t au capteurs récepteurs i et j ;
- ✓ V_{prop} : Est la vitesse de propagation du signal de l'émetteur.

En supposant que l'emplacement des capteurs récepteurs est connu et que les deux capteurs récepteurs sont parfaitement synchronisés, l'équation définit une branche

d'hyperbole à laquelle le capteur émetteur doit se trouver.

Les positions probables du noeud capteur émetteur (NC) constituent une hyperbole ayant comme foyer les positions des deux noeuds récepteurs (NR). Dans la méthode des TDoA, il nous faut nécessairement quatre noeuds récepteurs (NR), comme le montre la figure 3.9. Par ailleurs, la position en deux dimension du NC est obtenue à partir de trois différences de distance d_{21}, d_{31} et d_{41} (avec $d_{ji} = d_j - d_i$ est la différence de distance entre les $j^{\text{ème}}$ et $i^{\text{ème}}$ NR, et d_k est la distance qui sépare le $k^{\text{ème}}$ NR du NC) comme suit :

$$\begin{cases} d_{21} = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ d_{31} = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ d_{41} = \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \end{cases} \quad (3.23)$$

Et d_{ji} peut être calculée à partir des ToA estimés t_j et t_i comme suit [91] :

$$\begin{aligned} d_{ji} &= d_j - d_i \\ &= (t_j - T_0) \cdot V_{prop} - (t_i - T_0) \cdot V_{prop} \\ &= (t_j - t_i) \cdot V_{prop} \\ &= t_{ji} \cdot V_{prop} \end{aligned} \quad (3.24)$$

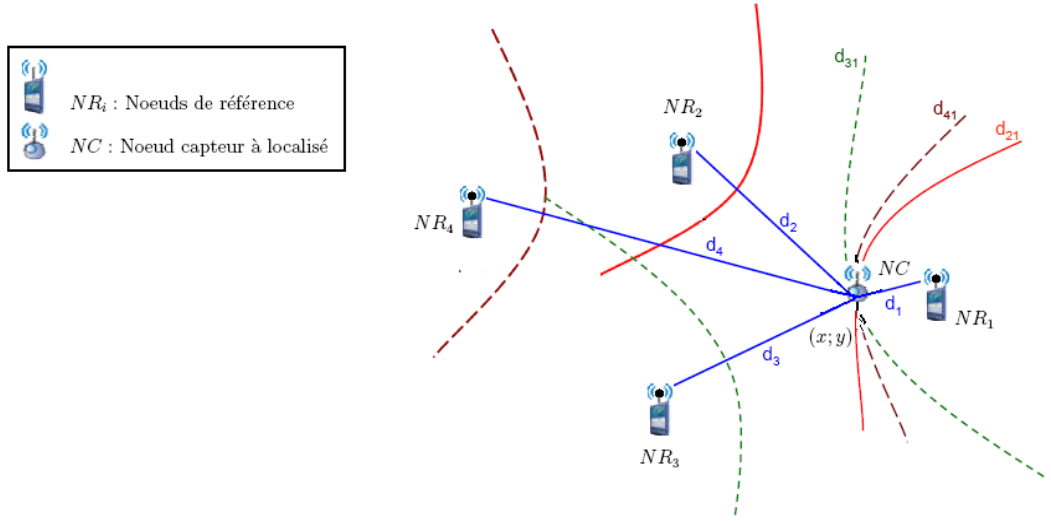


Figure 3.9 : Mesure de TDOA utilisant la méthode des hyperboles.

3. **La mesure de l'Angle/Direction d'Arrivée (AoA/DoA) :** A la place des distances, il est possible de localiser un noeud capteur en utilisant des angles. La technologie AoA/DoA (Angle of Arrival, Direction of Arrival) permet de mesurer l'angle d'arrivée de tous les signaux reçus de chaque noeud du voisinage. Cette technique appelée VOR (VHF Omni-directional Range) est largement répandue pour la navigation aérienne et permet aux avions de déterminer leur direction. L'AoA est également dérivée de celle utilisée par les systèmes de radar, GSM, et ainsi que les GPS [66, 81].

La localisation peut être très précise mais nécessite des bornes micanisées ou motorisées pour calculer les angles. La technologie AoA calcule l'angle formé entre deux

noeuds capteurs, au moins. Chaque capteur doté d'antennes orientées de sorte à calculer l'angle d'émission du signal et en déduire la position du capteur à localiser par la technique de triangulation qui est fortement corrélée avec cette méthode de mesure AoA.

Ces technologies AoA/DoA peuvent obtenir une précision de l'ordre de quelques degrés (Priyantha, et al., 2001). Malheureusement, elles exigent plus de matériels que la technique TDoA, donc elle est plus coûteuse et les noeuds tendent à être plus volumineux. Il existe peu d'algorithmes de localisation qui sont basés sur la technique AoA, même si plusieurs d'entre eux sont capables de l'utiliser quand elle est présente [65].

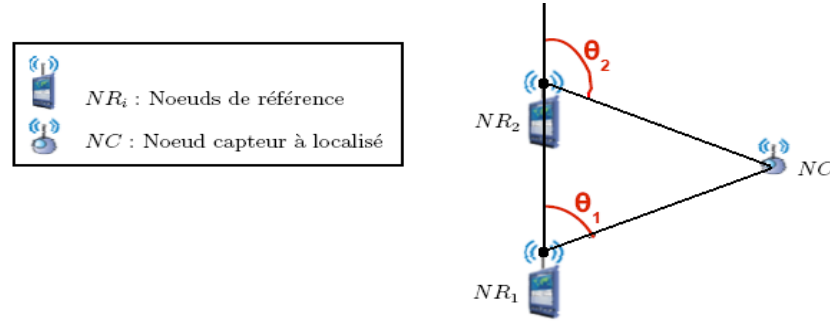


Figure 3.10 : La méthode de mesure AoA.

4. La mesure du temps d'arrivée (ToA) :

La technologie ToA (Time of Arrival) estime le temps de vol (Time of Flight : TOF) du signal entre le noeud émetteur et les noeuds récepteurs pour estimer, par la suite, la distance qui sépare le noeud capteur émetteur (NE) des noeuds capteur récepteurs (NR) en utilisant le temps de propagation de signal mesuré et la vitesse connue de signal. Cependant, afin d'éviter toute ambiguïté sur le calcul du TOF, deux solutions peuvent être envisagées :

4.1. La première solution est ToA à sens unique (One-way ranging) : Les mesures basées sur le temps de propagation à sens unique, dont le principe général est illustré dans la figure 3.11.(A), nécessite la synchronisation parfaite entre le capteur émetteur et les capteurs récepteurs du réseau (c'est-à-dire les noeuds capteurs doivent avoir la même horloge), qui est, toutefois, une tâche lourde à assurer. Dans cette situation, l'onde effectue un aller simple entre le capteur émetteur et le capteur récepteur comme le montre la figure 3.11.(A)[74]. Dans ce cas, la distance, qui sépare le $i^{ème}$ noeud capteur récepteur (NR) du noeud capteur émetteur (NE), se déduit de la vitesse de propagation du signal radio et de la différence entre les dates d'émission et de réception du message. Cette technologie est celle utilisée par le système GPS (Global Positioning System). Dans ce cas, les distances s'écrivent comme suit :

$$d_i = (t_i - T_0) \cdot V_{prop} \quad (3.25)$$

Où t_i est l'instant d'arrivée de l'onde au niveau du $i^{ème}$ NR et T_0 est l'instant d'émission du signal. La vitesse de propagation du signal radio est $\cong 3 \times 10^8$ m/s.

4.2. La deuxième solution est ToA bi-directionnel (Two-way ranging) : Les mesures basées sur le temps de propagation bi-directionnel c'est-à-dire aller-retour peuvent être adoptées pour éviter le problème de l'ambiguïté lorsque les noeuds ne sont pas synchrones, nécessitent l'utilisation de protocoles de communication, comme indiqué dans la figure 3.11.(B) [92]. Cette dernière montre clairement que l'envoi d'un message aller-retour est nécessaire. En fonction de son horloge, de la vitesse de propagation du signal, et du temps de traitement du signal reçu, un capteur récepteur obtient la distance qui le sépare du capteur émetteur en calculant la différence entre les dates d'émission et de réception, en y soustrayant le temps de traitement du signal, puis en divisant le résultat par deux. Cela suppose que les noeuds du réseau ont un temps de traitement du signal identique. Dans ce cas, les distances s'écrivent comme suit :

$$d_i = \left(\frac{1}{2}(t_i - T_0) - T_{R;i} \right) \cdot V_{prop} \quad (3.26)$$

Où t_i et T_0 sont définis dans l'équation précédente et $T_{R;i}$ est le temps mis par le $i^{ème}$ NR pour répondre à la requête de l'émetteur.

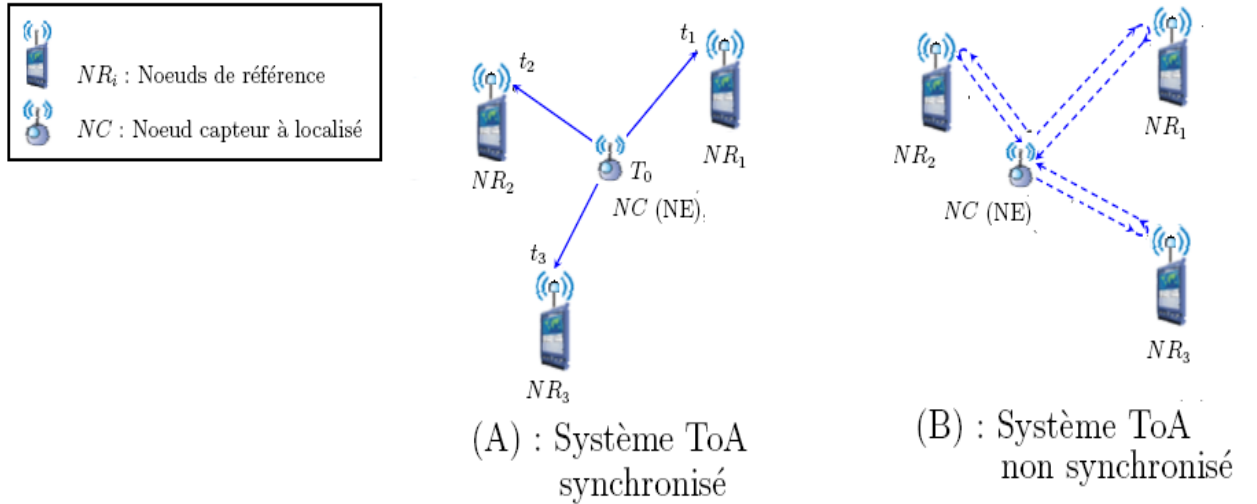


Figure 3.11 : La méthode de mesure du ToA.

3.5.2 Méthodes de localisation de mesures libres (RANGE-FREE)

Dans cette famille de méthodes de mesures libres, les capteurs cherchant à déterminer leurs positions s'appuient uniquement sur les positions des ancres. Aucune mesure de distance ou d'angle n'est utilisée. Les méthodes (He et al., 2005 ; Bulusu et al., 2000 ; Nagpal et al., 2003 ; Chan et al., 2005 ; Datta et al., 2006 ; Liu et al., 2007, 2005c), pour ne citer qu'elles, sont des exemples de méthodes libres de mesure. Il existe deux techniques courantes dans ce type de méthodes :

- La première technique consiste à définir des zones contenant les capteurs dont les centres de gravité correspondent à leurs positions estimées. Par exemple, dans (He et al., 2005) les auteurs proposent le raisonnement suivant :

Soit n étant le nombre d'ancres dans le réseau, chaque ancre diffuse sa position. Lorsqu'un capteur obtient les positions des n ancres, il calcule tous les triangles possibles qu'il peut former avec ces positions et obtient alors un ensemble de (C_n^3) triangles. Ensuite, pour chaque triangle, le capteur détermine s'il se situe à l'intérieur ou à l'extérieur.

Après avoir déterminé son appartenance ou non à chacun des triangles, il en déduit une zone le contenant et calcule sa position estimée comme étant le centre de gravité de cette zone. En présence d'un pourcentage faible d'ancres dans le réseau, cette solution est intéressante. En revanche, si l'augmentation de ce pourcentage améliore la précision des positions, elle engendre dans le même temps des calculs importants pour les capteurs.

Dans (Datta et al., 2006), les auteurs définissent des zones en utilisant non pas des triangles mais des polygones.

- Dans la seconde technique, chaque capteur estime les distances qui le sépare des ancres et applique la multilatération pour calculer sa position estimée. La méthode HTRefine (Savarese et Rabaey, 2002) utilise ce procédé. Ce schéma est également adopté par des méthodes basées mesures.

Elles semblent donner de bons résultats dans les réseaux denses et réguliers. Parmi les algorithmes range-free, nous citons : APS (Niculescu, et al., 2001) avec ses trois méthodes (Dv-Hop, Dv-Distance et Euclidian distance), GPS-less (Bulusu, et al., 2000), Convex position (Doherty, et al., 2001) et APIT (He, et al., 2003), Dv-Hop, Hop Terrain, Gradient Algorithm.

1. **Méthode DV-Hop** : DV-Hop est une méthode de localisation de mesures libres très populaire. Sa version originelle ainsi que plusieurs améliorations sont présentées dans cette section.

- 1.1. **DV-Hop originel** : La méthode de localisation DV-Hop [75] s'inspire des protocoles de routage à vecteur de distance pour proposer une estimation de la position des noeuds capteurs basée sur le nombre de sauts. Chaque ancre est ici chargée d'émettre une trame contenant sa position et un champ dédié au comptage de sauts. A la réception de ce message, tous les noeuds capteur décideront de le retransmettre ou non en comparant le nombre de sauts vers l'ancre contenu dans la trame à l'information stockée en mémoire. Si le hopcount est inférieur au contenu de la mémoire, les données sont mises à jour, le champ de la trame est incrémenté et la trame retransmise.

Une fois que toutes les balises (beacons) ont récupéré la position et le nombre de sauts minimum qui les séparant de leurs homologues, elles calculent une

distance moyenne par saut (hopsize). Par exemple, le noeud ancre A_1 (figure 3.12) peut calculer les distances géométriques entre elle et les beacons A_2 et A_3 . Elle connaît également le nombre de sauts entre elle et ses voisines.

L'équation ci-dessous (3.27) permet d'estimer la taille de saut. Ici, $d_{i,j}$ est la distance réelle entre les beacons i et j et $hop_{i,j}$ correspond au nombre de sauts entre les beacons i et j .

$$Hopsize_i = \frac{d_{1,2} + d_{1,3}}{hop_{1,2} + hop_{1,3}} = \frac{\sum \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum h_{ij}} \text{ pour chaque } i \neq j \quad (3.27)$$

- ✓ $(x_i - y_i)$: La position de beacon i ;
- ✓ $(x_j - y_j)$: La position de beacon j ;
- ✓ h_{ij} : Le nombre de sauts entre beacon i et les autres beacons ;
- ✓ $Hopsize_i$: La longueur estimée d'un saut par rapport au beacon i .

Cette taille de saut est rediffusée à l'ensemble du réseau. Elle sera utilisée par un noeud capteur quelconque pour estimer sa distance par rapport à une ancre. Un noeud la détermine par l'équation (3.28) où $Hopcount_{i,k}$ est le nombre de sauts entre le noeud capteur k et le beacon i . Une fois les distances à trois beacons connues, le noeud capteur peut appliquer la trilatération pour trouver sa position.

$$d_{i,k} = Hopsize_i \times Hopcount_{i,k} \quad (3.28)$$

De cette manière, DV-Hop se propose de résoudre le problème de la localisation de tous les noeuds, même ceux hors de portée des ancres, les relais de trames s'effectuant alors via les autres noeuds capteurs dans une topologie ad-hoc.

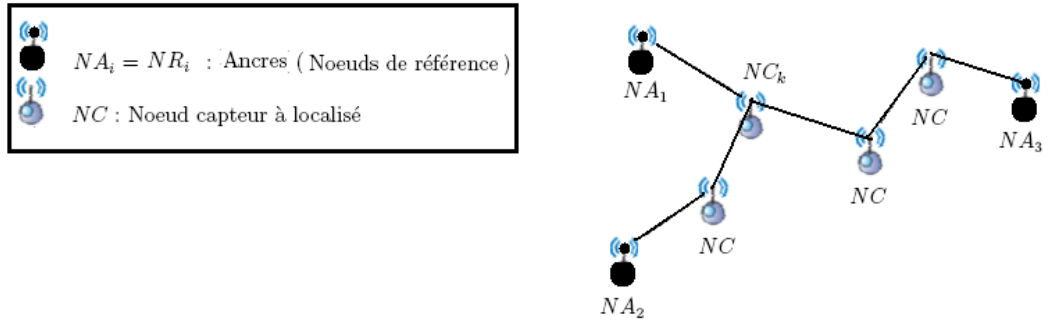


Figure 3.12 : Principe topologique de DV-Hop.

- ♦ **Constraint DV-Hop** : Une amélioration a été proposée [93] avec pour point de départ la relation implicite existant entre la portée de communication D des noeuds et la distance calculée par DV-Hop.

En effet, si un noeud se trouve à un saut d'une ancre, la distance entre les deux est inférieure ou égale à D . De même, si l'écart est de deux sauts, la borne devient alors le double de la portée. Partant de cette remarque, Constraint DV-Hop propose de

déterminer les coordonnées du noeud capteur en observant les contraintes liées à la portée. Le système s'écrit alors à l'aide des équations (3.29) à (3.31).

$$\sum_{i=1}^M ((x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 - d_i^2)^2 \rightsquigarrow Min \quad (3.29)$$

$$\sqrt{(x_{v_j} - x_u)^2 + (y_{v_j} - y_u)^2} \preceq D, L = 1 \quad (3.30)$$

$$D \preceq \sqrt{(x_{v_j} - x_u)^2 + (y_{v_j} - y_u)^2} \preceq D \cdot L, L \neq 1, j = 1, \dots, M_1 \quad (3.31)$$

Cette proposition a été validée par une simulation de 100 noeuds, dispersés sur une surface de 50 m × 50 m. Les différentes expérimentations, avec un ratio d'ancres variables ou des modifications de la portée radio, ont indiqué la supériorité de CDV-Hop (Constraint DV-Hop) par rapport à DV-Hop.

- 1.2. **Checkout DV-Hop :** Dans la même optique d'amélioration de DV-Hop, le travail réalisé dans [94] distingue deux classes de noeuds capteur : les noeuds capteurs de niveau 1 sont à portée d'au moins 3 beacons et ceux de niveau 2 ne satisfont pas à cette condition. Un algorithme est proposé pour chacune des classes.

Pour les noeuds de niveau 1, la Mid-Perpendicular Method est utilisée. On considère les médiatrices des côtés du triangle formé par les ancres. Leur intersection désigne le centre du cercle circonscrit au triangle, point équidistant de tous les sommets. Les équations de deux médiatrices sont formées à partir des coordonnées de deux des ancres à portée.

Le travail réalisé représente également une amélioration de DV-Hop lorsque sont considérés les noeuds de niveau 2. Dans ce cas, Checkout DV-Hop, ajoute une étape de vérification (checkout). L'ancre la plus proche en termes de nombre de sauts, notée A_{near} , est celle pour laquelle l'accumulation d'erreurs lors du calcul de la distance entre le noeud capteur et cette ancre est la plus faible. L'écart entre A_{near} et le noeud capteur servira alors de référence pour corriger la position estimée par DV-Hop (Figure 3.13).

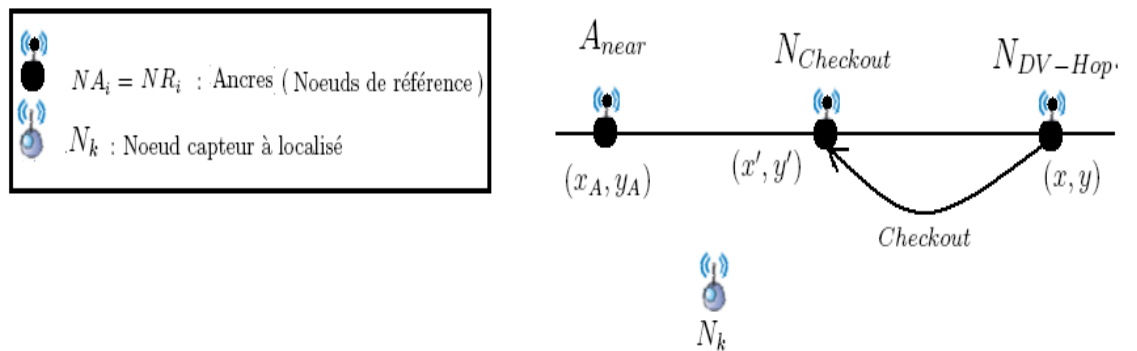


Figure 3.13 : Principe de Checkout DV-Hop.

La Figure (3.13) illustre l'effet de Checkout DV-Hop. La vraie position du noeud est N_k mais l'algorithme DV-Hop avait indiqué N_{DV-Hop} comme position probable. Connaissant la distance entre A_{near} et N_k , un nouveau point a été choisi par Checkout DV-Hop. Ce point, $N_{Checkout}$, se trouve à la même distance d' A_{near} que N_k mais fait partie de la droite passant par A_{near} et N_{DV-Hop} .

2. **Méthode centroid ou GPS-less :** Un nombre fixé de noeuds spéciaux, appelés noeuds beacon, sont placés à l'avance. Ils ont des régions de couverture superposées et servent de points de référence. Chaque noeud beacon transmet un message "beacon" tous les temps T , qui contient sa position. Un noeud voulant se localiser écoute pendant un certain temps les beacons. Il choisit un certain nombre de noeuds beacons et calcule sa position en prenant le centroïde des positions des beacons choisis [80].

Pour choisir les beacons, il calcule pour chaque beacon i entendu,

$$CM_i = \frac{\text{Nombre messages envoyés par } i}{\text{Nombre message reçus}} \times 100 = \frac{N_{recv}(i, t)}{N_{sent}(i, t)} \times 100 \quad (3.32)$$

Il calcule cela pendant un certain laps (espace) de temps (en sachant que tous les temps T chaque beacon est censé avoir émis un message) et choisit tous les noeuds qui sont au dessus d'un certain seuil (par exemple 90 %).

Le désavantage principal de cette méthode est le fait d'avoir à placer ces noeuds beacons partout où l'on veut être localisable. De plus les noeuds 'beacons' consomment une grande quantité d'énergie.

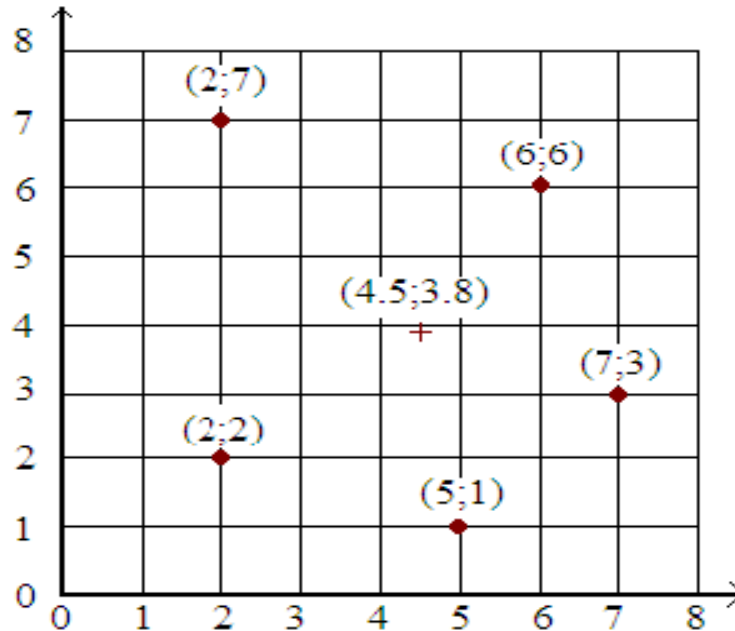


Figure 3.14 : Exemple de localisation avec centroid ou GPS-less.

3. **Méthode APIT** : La méthode APIT (Approximate Point In Triangulation) [95] est spécialement optimisée pour le critère de la consommation d'énergie. Elle nécessite un certain nombre de noeuds "beacon" comme pour le GPS-less. Il est spécifié que ces noeuds ont des émetteurs longue portée. Ces beacons émettent des messages contenant leur position en continu.

Un noeud qui veut se localiser écoute les beacons passants. Pour chaque triplet de beacons différent découvert, il crée un triangle (il connaît les positions des beacons). Il rejette certains d'entre eux via un test appelé PIT test. Il trouve ensuite l'intersection des triangles restants et obtient ainsi une région dans laquelle se trouve le noeud. Le centroïde de cette région est pris comme estimation de position. On peut voir cela de façon intuitive dans la Figure 3.15.

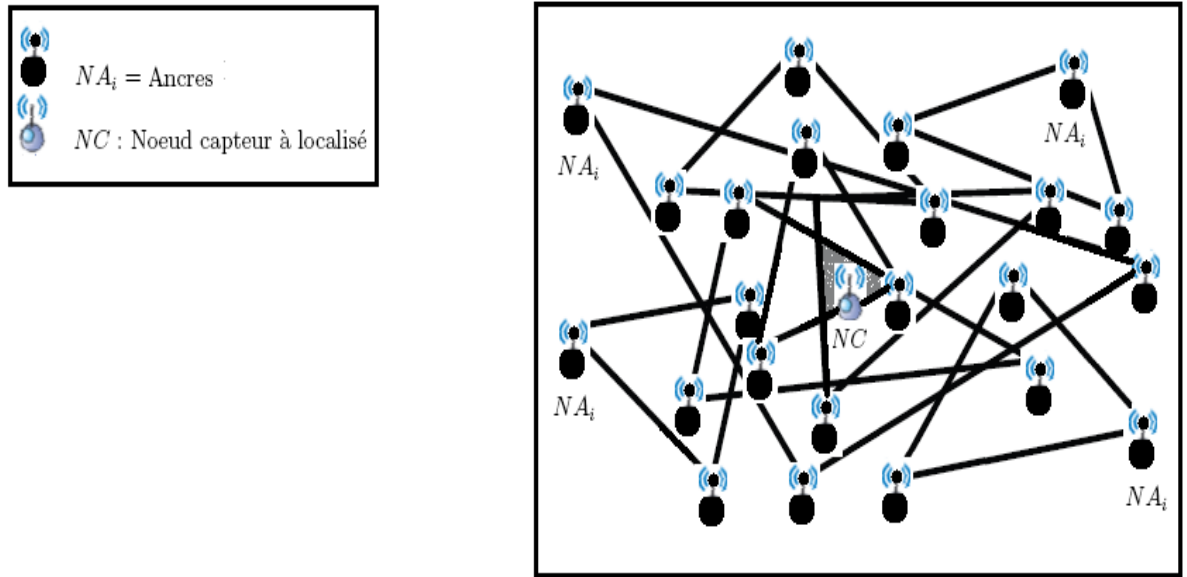


Figure 3.15 : Exemple de localisation avec La méthode APIT.

3.6 Comparaison des méthodes d'estimation des distances/angles

Le choix de la méthode d'estimation de distance/angle entre les noeuds est un facteur important qui influe sur les performances finales du système de localisation. Généralement, pour calculer une position, un noeud a besoin de trois distances (angles) estimées et chacune d'elle avec une erreur associée. Si seulement la précision est importante, la méthode TDoA est la plus précise. Mais d'autres facteurs comme la taille et le coût (en termes de matériel supplémentaire, ressources processeur, énergie) du noeud sont à prendre en considération. Pour cela, la méthode choisie pour estimer les distances/angles dépend des besoins de l'application ainsi que des ressources disponibles. Le Tableau 3.2 - liste les caractéristiques essentielles des méthodes décrites dans les paragraphes précédents.

Méthode	Précision	Distance maximale	Matériel supplémentaire	Défis (challenges)
RSSI	2-4 m	La portée	Rien	Variations du RSSI, Interférences
ToA	2-3 cm	La portée	Rien	Synchronisation des noeuds
TDoA	2-3 cm	Quelques mètres (2-10 m)	Capteur à Ultrason	La distance maximale
AoA	Quelques degrés (5 %)	La portée	Un ensemble de récepteurs	Travailler avec des noeuds de petite taille
Portée de la communication	$\frac{1}{2}$ La portée	La portée	Rien	/

TABLE 3.2 – Comparaison des méthodes d'estimation des distances angles

3.7 Les familles de méthodes de localisation qui partagent le même schéma d'exécution

Ces familles, décrites ci-après, ont pour références les méthodes HTRefine (méthode libre de mesure), SumDistMinMax, APS (deux méthodes basées mesures de distances) et APS_{AoA} (méthode basée mesures d'angles). Ces quatre méthodes partagent le même schéma d'exécution : chaque ancre diffuse sa position, les capteurs calculent alors une estimation des distances avec les ancres et enfin déduisent leurs positions.

3.7.1 Méthode HTRefine

Dans la méthode HTRefine (méthode libre de mesure), toutes les ancres diffusent leurs positions. Lorsqu'un capteur qui veut se localiser reçoit la position d'une ancre, il estime la distance qui le sépare d'elle. Pour ce faire, HTRefine utilise la technique d'estimation des distances DV-Hop (Distance Vector-Hop).

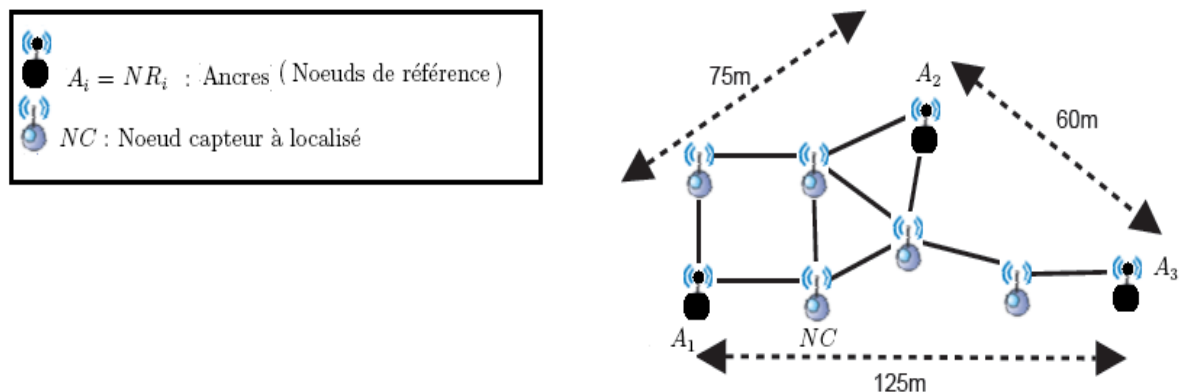


Figure 3.16 : DV-Hop.

Dans cette technique, lors de l'inondation des positions des ancres, chaque capteur calcule le nombre de sauts minimum qui le sépare de chacune des ancres. Une deuxième vague d'inondation fournit suffisamment d'informations au capteur pour qu'il puisse convertir ces nombres de sauts en estimations de distances [65].

La conversion consiste à multiplier le nombre de sauts séparant le capteur d'une ancre par une distance moyenne entre deux capteurs voisins. Lors de la première vague, lorsqu'une ancre A_1 reçoit la position d'une ancre A_2 , elle calcule la distance euclidienne qui les sépare et la divise par le nombre de sauts. Elle obtient ainsi une moyenne des distances des sauts entre elle et A_2 et la communique aux capteurs. Lorsque A_1 reçoit d'autres positions d'ancres, elle calibre à nouveau sa distance moyenne et diffuse cette mise à jour aux capteurs afin qu'ils puissent affiner leurs estimations de distances .

La figure 3.16, est une illustration de DV-Hop où l'ancre A_1 estime la distance moyenne d'un saut. Les noeuds noirs représentent les ancres et les noeuds blancs les capteurs non localisés. Trois sauts séparent A_1 et A_2 alors que quatre séparent A_1 de A_3 .

- L'ancre A_1 calcule les distances euclidiennes : $d_{A_1,A_2} = 75m$ et $d_{A_1,A_3} = 125m$;
- La distance moyenne d'un saut est donnée par la fraction : $\frac{125+75}{3+4} = 28.57m$;
- Le capteur NC estimera les distances avec A_2 et A_3 comme suit : $d_{NC,A_2} = 2 \times 28.57$ et $d_{NC,A_3} = 3 \times 28.57$.

Pour obtenir leurs positions, les capteurs utilisent ensuite la multilatération. En reprenant l'exemple de la figure 2.2, NC obtiendra sa position en résolvant le système suivant :

$$\begin{cases} d_{A_1,NC}^2 &= (X_{NC} - X_{A_1})^2 + (Y_{NC} - Y_{A_1})^2 \\ d_{A_2,NC}^2 &= (X_{NC} - X_{A_2})^2 + (Y_{NC} - Y_{A_2})^2 \\ d_{A_3,NC}^2 &= (X_{NC} - X_{A_3})^2 + (Y_{NC} - Y_{A_3})^2 \end{cases} \quad (3.33)$$

Finalement, un processus de raffinement (distinction) des positions est effectué. En effet, après avoir estimé leurs positions, les capteurs les diffusent à leurs voisins. En fonction de ces données et grâce aux relations de voisinage, les capteurs calculent à nouveau leurs positions qui se rapprochent de leurs positions réelles. Après un nombre d'itérations défini, les capteurs fixent leurs positions estimées [65].

3.8 Méthode SumDistMinMax

Dans la méthode SumDistMinMax (méthode basée mesure de distance) [65], chaque ancre commence par diffuser sa position. Lorsqu'un capteur reçoit cette position, il estime la distance qui le sépare de cette ancre en appliquant la technique SumDist qui est la plus simple pour l'estimation de la distance entre un capteur et une ancre. Elle consiste à ajouter les distances mesurées entre chaque paire de capteurs voisins séparant l'ancre et

le capteur qui cherche à estimer sa position.

Lorsqu'une ancre envoie sa position, elle joint au message la distance qui la sépare d'elle même, c'est à dire 0. A la réception de ce message, chaque capteur voisin mesure la distance avec l'émetteur, l'enregistre, ajoute cette distance à celle contenue dans le message et fait suivre la position de l'ancre avec la distance mise à jour. Le même processus est répété pour tous les capteurs.

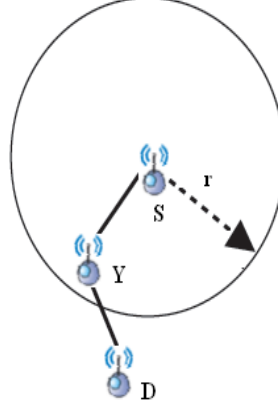


Figure 3.17 : SumDist.

Au final, chaque capteur obtient la position de chacune des ancres et calcule une estimation de la distance qui le sépare de celle-ci. La figure 3.17 illustre le fonctionnement de SumDist. Sur cette figure, la distance estimée entre les noeuds S et D est égale à $d_{SY} + d_{YD}$ sachant que de par l'inégalité triangulaire : $d_{SD} \preceq d_{SY} + d_{YD}$.

Soit $x_1, x_2, \dots, x_q, a$ étant un chemin d'un capteur x_1 vers une ancre a , l'estimation de la distance entre x_1 et a (notée $\hat{d}_{x_1a}$) est définie de façon récursive comme suit :

$$\hat{d}_{x_1a} = d_{x_1x_2} + \hat{d}_{x_2a} \quad (3.34)$$

Après cette phase d'estimation des distances avec les ancres, les capteurs calculent leurs positions estimées en utilisant la méthode Min-Max. Le principe de cette méthode est de déterminer, pour chaque capteur, une « boîte » le contenant dont le centre de gravité correspond à sa position estimée.

Sur la figure 3.18, le capteur X associe une « boîte » à chacune des ancres A_1, A_2, A_3 . Chaque « boîte » est centrée en la position de l'ancre $((x_{A_1}, y_{A_1}))$ et dépend de la distance estimée $(\hat{d}_{XA_1})$ avec le capteur X . Par exemple, la « boîte » centrée en A_1 est construite comme suit :

$$[x_{A_1} - \hat{d}_{XA_1}, y_{A_1} - \hat{d}_{XA_1}] \times [x_{A_1} + \hat{d}_{XA_1}, y_{A_1} + \hat{d}_{XA_1}] \quad (3.35)$$

L'intersection de ces « boîte » forme une nouvelle « boîte » définie par :

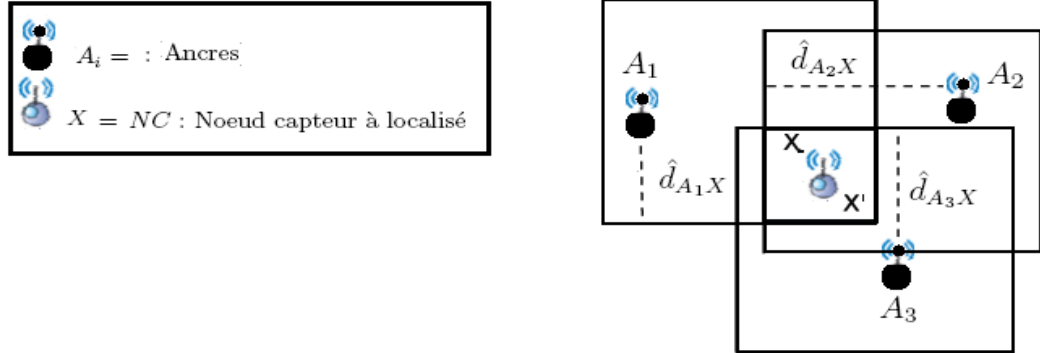


Figure 3.18 : Min-Max.

$$[Max(x_i - \hat{d}_{X_i}), Max(y_i - \hat{d}_{X_i})] \times [Min(x_i + \hat{d}_{X_i}), Min(y_i + \hat{d}_{X_i})], i \in \{A_1, A_2, A_3\} \quad (3.36)$$

Le capteur X estime sa position (notée X') comme étant le centre gravité de cette « boîte ».

Enfin, chaque capteur exécute un processus de raffinement où les relations de voisinage et les mesures de distances entre voisins sont prises en compte afin de faire tendre sa position estimée vers sa position réelle. L'inconvénient de cette méthode est l'accumulation des erreurs de mesure notamment dues à la technique d'estimation des distances SumDist et au processus de raffinement.

3.9 Méthode APS

Dans APS ([méthode basée mesure de distance](#)) [65] et comme précédemment, les ancres commencent par diffuser leurs positions et les capteurs estiment les distances qui les séparent de ces ancres. La technique d'estimation des distances utilisée dans APS est nommée Euclidean.

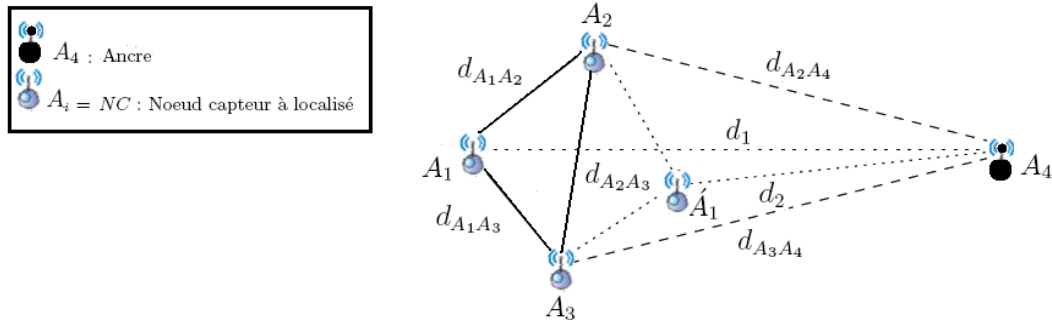


Figure 3.19 : Euclidean.

Cette technique calcule, sous certaines conditions, une distance exacte lorsqu'un capteur connaît deux voisins ayant estimé leurs distances avec une ancre. Le principe de cette méthode est illustré en figure 3.19.

Soient A_1, A_2, A_3 étant des capteurs et A_4 une ancre. A_1 cherche à calculer sa distance avec A_4 . A_2 et A_3 sont voisins de A_1 et voisins entre eux. A_1 et A_2 ont calculé leurs distances avec A_4 ($d_{A_2A_4}, d_{A_3A_4}$). A_1 connaît alors les distances ($d_{A_1A_2}, d_{A_1A_3}, d_{A_2A_3}, d_{A_2A_4}, d_{A_3A_4}$).

Par conséquent, il connaît tous les côtés et une diagonale du quadrilatère $A_1A_2A_3A_4$. La seconde diagonale correspond à la distance $d_{A_1A_4}$. Mais deux distances sont possibles (d_1 et d_2). Un processus de vote des voisins et un autre dit du voisin commun permet à A_1 de déduire la distance qui le sépare de A_4 .

En fait, ces processus font intervenir un troisième capteur ayant lui aussi estimé sa distance avec A_4 . Selon le cas où ce capteur est voisin de A_2 ou A_3 , ou bien voisin des deux, ces processus, par de simples relations géométriques, déduisent la distance $d_{A_1A_4}$.

Une fois les distances avec les ancres obtenues, les capteurs appliquent alors la multilatération décrite ci-avant. Dans APS, aucune phase de raffinement n'est proposée puisque les contraintes imposées par le voisinage et par les distances sont prises en compte lors de l'estimation des distances.

3.10 Méthode APS_{AoA}

APS_{AoA} (méthode basée mesures d'angles) [65] est une extension de la méthode précédente qui considère des capteurs ayant, non pas la capacité de mesurer les distances avec leurs voisins, mais celle de mesurer les angles.

Au départ, les ancres diffusent leurs positions et les capteurs voisins cherchent à déduire les angles qu'ils forment avec chacune d'elles par rapport à leurs propres axes de référence. Ces capteurs font alors suivre leurs angles à leurs voisins pour qu'ils puissent déduire leurs angles à leurs tours et ainsi de suite.

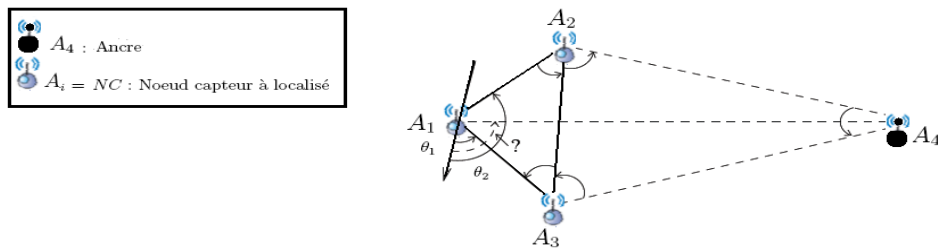
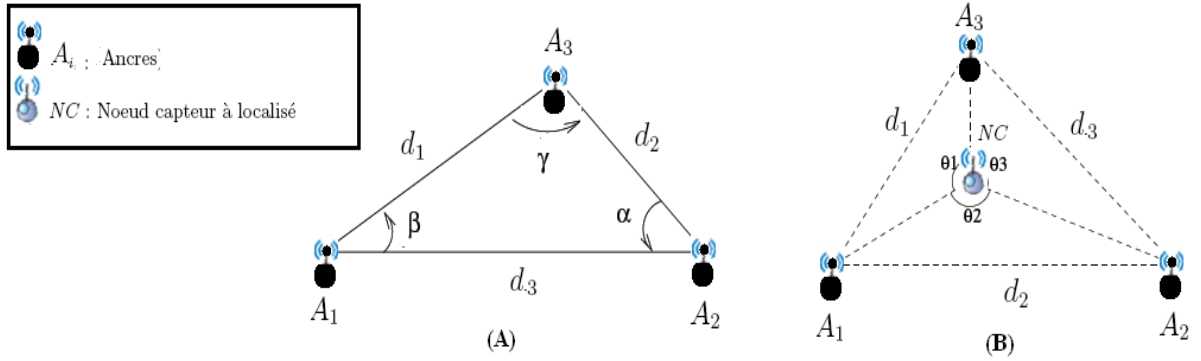


Figure 3.20 :APS avec AoA .

La figure 3.20, présente comment un capteur déduit l'angle avec une ancre distante. Le capteur A_1 cherche à déduire son angle avec l'ancre A_4 par rapport à son axe de référence. Les capteurs A_2 et A_3 , voisins de A_1 et voisins entre eux, connaissent les angles respectifs qu'ils forment avec A_4 . Ainsi les angles des triangles $A_1A_2A_3$ et $A_2A_3A_4$ sont connus et l'angle $\widehat{A_4A_1A_3}$ peut être calculé. L'angle par rapport à l'axe de A_1 sera donc égal à $\theta_1 + \widehat{A_4A_1A_3}$.

Dès lors qu'un capteur a obtenu les angles qu'il forme avec au moins trois ancres, il obtient sa position grâce à la triangulation qui, en considérant la figure 3.21-(A), donne le système suivant :



$$\text{Les formules du cosinus : } \begin{cases} d_1^2 = d_2^2 + d_3^2 - 2d_2d_3 \cdot \cos(\alpha) \\ d_2^2 = d_1^2 + d_3^2 - 2d_1d_3 \cdot \cos(\beta) \\ d_3^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2 \cdot \cos(\gamma) \end{cases} \quad (3.37)$$

Ainsi, la triangulation sera utilisée lorsqu'un capteur cherchant sa position possède au moins trois ancres dans son voisinage comme illustré en figure 3.21-(B). En connaissant les distances d_1, d_2, d_3 entre les ancres et les angles $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, le capteur calcule sa position.

3.11 La localisation dans les réseaux mobiles

Dans la littérature, le problème de la localisation dans les réseaux mobiles n'est pas abordé de la même manière que dans les réseaux statiques. Les travaux recensés cherchent à utiliser la mobilité pour contribuer à la localisation de capteurs statiques. Par exemple, les travaux décrits dans (Bulusu et al., 2001 ; Priyantha et al., 2005) utilisent des robots mobiles qui peuvent être assimilés à des ancres. Une stratégie de déplacement est alors définie afin d'aider à la localisation des capteurs. Il est à noter que ces robots n'ont aucune contrainte d'énergie ce qui simplifie considérablement le problème [65].

Les réseaux de capteurs mobiles considèrent des capteurs libres dans leurs déplacements; c'est à dire qu'aucun des déplacements, et notamment ceux des ancrs, n'est prédictible. Trois configurations sont alors possibles :

- Soit tous les capteurs sont mobiles (ancres et autres) (par exemple, l'étude des flux migratoires : certains animaux sont équipés d'ancres, d'autres non) ;
- Soit les capteurs sont mobiles et les ancrs statiques (par exemple, dans un contexte militaire : les bases militaires sont des ancrs et les soldats se localisent en fonction d'elles) ;
- Soit les capteurs sont statiques et les ancrs mobiles (par exemple, la surveillance des feux de forêt : les animaux sont des ancrs et les capteurs sont largués dans la forêt).

Etant donné ce contexte de mobilité, un nouveau problème apparaît. En effet, les limites imposées par les ressources en énergie empêchent les capteurs de demander de façon continue leurs positions. Il est donc nécessaire de définir une stratégie d'ordonnement des dates auxquelles un capteur invoquera sa position. Un premier travail a été proposé dans [\(Tilak et al., 2005\)](#) mais fait une supposition forte en considérant que tous les capteurs sont des ancrs.

3.12 Forme d'implémentation

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

3.12.1 Les méthodes centralisées

Tous les noeuds communiquent avec leurs voisins et renvoient à l'ordinateur central soit des informations sur le signal, soit directement les distances. L'ordinateur central s'occupe si nécessaire d'estimer les distances à partir des informations sur le signal et ensuite de localiser les noeuds [80, 96].

3.12.2 Les méthodes distribuées

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

3.12.3 Comparaison entre les méthodes centralisées & distribuées

Une comparaison entre les méthodes distribuées et centralisées est présentée dans le tableau ci-dessous. Cette comparaison montre les différentes caractéristiques de ces méthodes en tenant compte des critères de localisation [97, 98, 79, 99, 100].

Les méthodes de localisation centralisées & distribuées		
Méthodes	Centralisées	Distribuées
Précision	Bonne à cause du calcul complexe	Moyenne/faible
Contraintes ressources	Non, les calculs se font sur la machine puissante	Oui, les noeuds font le calcul
Complexité	Très complexes, $O(n^2), O(n^3)$	Non complexes
Consommation d'énergie	Forte, grand nombre de communications	Faible
Passage à l'échelle	Non robustes	Robustes

TABLE 3.3 – Une comparaison entre les méthodes centralisées & distribuées.

3.13 Les critères des méthodes de localisation dans les RCSFs

Nous distinguons beaucoup d'autres critères à propos des méthodes de localisation. Nous en donnons ici une liste de critères non exhaustive. Ils est très intéressant de les découvrir même si dans la pratique, il est impossible de tenir compte de tous ces critères lors du développement d'un algorithme de localisation. Néanmoins, il peut être intéressant de les garder à l'esprit afin de pouvoir rendre notre méthode meilleure selon tel ou tel critère. Un algorithme de localisation est évalué selon une liste de critères dont nous citons :

1. **Précision de la localisation** : L'erreur de la localisation est souvent définit comme étant, la distance euclidienne entre les vraies positions des noeuds et les positions estimées ou calculées par un algorithme de localisation.

L'objectif d'un algorithme de localisation est de minimiser cette erreur pour augmenter la précision de localisation. Généralement, cette imprécision vient de l'imprécision des méthodes d'estimation de la distance.

Les obstacles environnementaux et les terrains irréguliers peuvent influencer la précision des algorithmes de localisation. Des obstacles comme de gros rochers peuvent interférer avec les ondes radios, et empêcher l'utilisation de $\prec$ TDoA $\succ$ du fait qu'on n'a plus une ligne droite.

2. **Contraintes de ressources** : Les noeuds capteurs possèdent généralement des ressources très limitées. Ils possèdent de faibles processeurs et de petites mémoires, ce qui rend les grands calculs irréalisables. Par conséquent, un algorithme de localisation doit être simple et non complexe et son développement n'exige pas de grands calculs ni de grande capacité de stockage de mémoire. De plus, nous ajoutons la rapidité de

l'algorithme. Avec quel rapidité le système de localisation renvoie-t-il les positions des noeuds ? Ceci est particulièrement important, surtout lors du traçage d'un chemin d'une cible.

3. **Contraintes (coût) énergétiques de la localisation :** La seule source d'énergie d'un noeud capteur est sa batterie. Pour cela, dans les réseaux de capteurs, une gestion de l'énergie très économique est nécessaire, et comme le facteur dominant de la consommation d'énergie est la communication radio, il faut trouver un algorithme de localisation qui communique le moins possible via la radio.
4. **Robustesse au bruit :** Il faut analyser comment un algorithme se comporte face au bruit rencontré dans les mesures de distances avec les voisins.
5. **Passage à l'échelle :** Les réseaux de capteurs sont généralement envisagés à large échelle, avec des centaines voir des milliers de noeuds. La question qui se pose, est-ce qu'un algorithme de localisation fonctionne sur un réseau de plusieurs milliers de noeuds ? Et si oui, est-il toujours aussi efficace ? Ce critère est en rapport avec le fait qu'un algorithme soit implémentable de façon distribuée ou non.
6. **Tolérance à la basse connectivité :** Les réseaux de capteurs sont également estimés à la basse connectivité. La question qui se pose, est-ce qu'un algorithme fonctionne dans un réseau à basse connectivité (un réseau où chaque noeud ne sait communiquer qu'avec un petit nombre de ses voisins) ? Comment sont affectées les performances d'un algorithme face à cette situation ?
7. **Réactivité du système :** Les réseaux de capteurs ne sont pas vraiment pris en compte pour la réactivité du système lors qu'il s'agit d'une localisation statique. La question qui se pose, avec quel rapidité le système de localisation nous renvoie-t-il les positions des noeuds ? Ceci est particulièrement important lorsque l'on veut s'occuper de noeuds mobiles et de suivi de cibles.

Les critères auxquels nous avons donné le plus d'attention sont la précision, la robustesse au bruit et le passage à l'échelle, quoique nous n'ayons pû faire de tests réels pour cette dernière. La réactivité du système n'a pas vraiment été pris en compte vu que nous étions dans le cas d'une localisation statique.

3.14 Conclusion

CE chapitre propose une famille de trois méthodes de localisation dans les réseaux statiques :

- La première est libre de mesure ;
- La seconde est basée sur les mesures de distances ;
- Et la dernière sur les mesures d'angles.

Ces méthodes ont la particularité de convertir des capteurs non localisés au départ en ancres afin de contribuer à la localisation des autres capteurs. Elles proposent également une gestion des erreurs de position ou de mesures et attribuent ainsi des positions précises à tous les capteurs.

En fin, les performances de ces méthodes sont comparées à celles des méthodes libres et basées mesures décrites ci-avant.

Chapitre 4

Algorithme de localisation pour les réseaux de capteurs sans fils

4.1 Formulation du problème

CONSIDÉRONS un capteur cible qu'on cherche à se localiser dans un espace connu, nous nous intéressons à la localisation par radio des capteurs. Afin de pouvoir connaître, à tout moment, l'emplacement ou les coordonnées de ce mobile, d'où un réseau de capteurs a été déployé dans cet environnement.

Parmi les techniques de localisation des RCSFs, on a choisi la technique de la puissance du signal reçu (RSSI), qui nécessite pas beaucoup de moyens pour sa mise en oeuvre. Ainsi, chaque capteur est considéré comme ancre émet des signaux RSSI que le capteur cible reçoit.

Connaissant les positions des ancres et les puissances des signaux parvenant de ceux-ci, le capteur cible calcule les distances le séparant de ces ancres et pourra déterminer sa position dans cet espace, en utilisant la technique de la multilatération.

Afin de modéliser le RSSI et les informations provenant des différentes sources, nous avons opté pour le modèle qu'est une régression linéaire simple entre l'indicateur c_{ij} et la distance d_{ij} .

Cette partie pratique a pour but d'introduire la notation utilisée pour le problème de la localisation dans un réseau de capteurs communiquant entre eux par des signaux (RSSI).

Soit N le nombre de noeuds déployés dans un environnement et $m \succeq 0$ le nombre

de capteurs appelés ancres et étiquetés (ordonnés) : $1, 2, \dots, m$ dont la position est connue à priori.

L'objectif de la procédure de localisation est de trouver la position de $n > 0$ capteurs cibles étiquetés (ordonnés) : $m + 1, \dots, N$ et donc $N = n + m$.

On représente la position réelle du capteur i dans un espace euclidien de dimension p par un vecteur dans $\mathbb{R}^p$: $c_i = [(x_{i1}, y_{i1}), (x_{i2}, y_{i2}), \dots, (x_{ip}, y_{ip})]$, avec $1 \leq i \leq N$. p est en général égal à 2 ou 3.

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

Le but de l'algorithme est de trouver $X_{cibles} = [c_j]$, $m + 1 \leq i \leq N$, pouvant être représenté par une matrice de taille $p \times n$.

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

$$J_1(\hat{c}) = \sum_{m+1 \leq i \leq N} \sqrt{(\hat{c}_i - c_i)^2} \rightsquigarrow Min \quad (4.1)$$

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

Soit $d_{ij} = \|c_i - c_j\| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ la distance euclidienne entre deux noeuds i et j . Et soit $\hat{d}_{ij}$ notre estimation de d_{ij} .

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

$$J_2(\hat{c}) = \sum_{m+1 \leq i, j \leq N} (\hat{d}_{ij} - d_{ij})^2 \rightsquigarrow Min \quad (4.2)$$

Nous ne connaissons au début que l'ensemble des distances ancres-ancres (D_{aa}) qui peuvent être calculées à partir de leurs positions (connues) :

$$D_{aa} = \left\{ d_{ij} = \|c_i - c_j\| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right\}, 1 \leq i, j \leq m. \quad (4.3)$$

Dans certains cas, le nombre d'ancres m est égal à zéro et donc $D_{aa} = \phi$. Comme nous nous plaçons dans le cas d'une localisation statique, on considère que deux noeuds i, j peuvent communiquer ensemble s'ils ont pu communiquer suffisamment longtemps pour permettre d'estimer la distance les séparant.

4.2 Technique de localisation RSSI

Le RSSI est la mesure de la puissance d'un signal reçu par un équipement. La perte de puissance entre l'émetteur et le récepteur est proportionnelle à la distance parcourue. La mesure RSSI (Received Signal Strength Identification) propose une estimation de la distance mais pas de son axe directeur. La mesure du RSSI est une valeur arbitraire, elle dépend de la manière dont le constructeur de l'équipement la implémente. La méthode de calcul de ce paramètre est donc à prendre en considération afin de connaître la valeur de l'information retournée par l'équipement.

4.2.1 Modélisation de l'atténuation du signal

Quand on cherche à effectuer une transmission sans fils, on s'intéresse à l'évaluation de la puissance captée par un récepteur en fonction de la puissance envoyée par un émetteur à une distance donnée. C'est le but de l'équation du bilan de liaison. Ce bilan tient compte de la puissance fournie, du gain des antennes, de la distance et des pertes. Si le milieu de propagation est homogène et isotrope (ce terme qualifiant les corps, les milieux, dont les propriétés sont semblables quelles que soient les directions), l'intensité diminue selon le carré de la distance.

Dans le cas où le milieu traversé n'est pas caractérisé par les pertes de propagation en espace libre, le RSSI est l'inverse du carré de la distance d entre l'émetteur et le récepteur. Dénotons la puissance reçue par $P_r(d)$ de la formule de Friis dans [86] suivante :

$$P_r(d) = P_t(d) \times G_t \times G_r \times \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^\alpha \quad (4.4)$$

- ✓ $P_r(d)$: Puissance du signal reçue ;
- ✓ $P_t(d) = P_e(d)$: Puissance du signal transmis (d'émission) ;
- ✓ G_r : Gain numérique de l'antenne du récepteur ;
- ✓ $G_t = G_e$: Gain numérique de l'antenne du transmetteur (l'émetteur) ;
- ✓ d : Distance entre l'émetteur et le récepteur ;
- ✓ α : Le coefficient d'affaiblissement du signal radio (dB) dépend du milieu de propagation $2 \preceq \alpha \preceq 6$;
- ✓ $\lambda = \frac{c}{f}$: Longueur d'onde en mètres (m) ;
- ✓ c : Vitesse de la lumière (m/s) ;
- ✓ f : Fréquence en MHz.

A l'aide du logiciel de calcul numérique Matlab, nous pouvons modéliser l'atténuation du signal par rapport à la distance parcourue.

L'équation de Friis peut s'exprimer d'une autre façon permettant de mettre en évidence l'affaiblissement. L'équation 4.5 permet de calculer l'affaiblissement pour une longueur d'onde donnée [1, 17].

$$\alpha = 20 \cdot \log \left(\frac{4\pi r d}{\lambda} \right) \quad (4.5)$$

Cette formule n'est à utiliser que dans le cas de fréquences supérieures à 140 MHz et ne tient pas compte de différents facteurs pouvant influencer[1].

- ✓ n : Le coefficient d'affaiblissement du signal radio (dB) ;
- ✓ λ : Longueur d'onde en mètres (m) ;
- ✓ d : Distance entre les transmetteurs (m) ;
- ✓ r : Le rapport en dB, entre deux puissances P_r et P_t .

4.3 Estimation des distances

4.3.1 Estimation des distances à partir des liens de communication

L'estimation de distance peut se faire sur base de différents indicateurs :

- ✓ Le temps de propagation d'une onde ;
- ✓ La puissance du signal à la réception (RSSI : Received Signal Strength Indicator) ;
- ✓ Le taux d'erreurs corrigées lors des transmissions (LQI : Link Quality Indicator).

De manière générale : Si c_{ij} est la valeur de l'indicateur entre les noeuds i et j et si la fonction f nous permet de déduire une estimation de la distance entre i et j (que nous notons $\hat{d}_{ij}$), nous avons donc :

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

En général, f est connue à priori et traduit le rapport entre distance et temps de propagation de l'onde dans le milieu de propagation. Les méthodes existantes mesurent le temps de propagation d'une onde sonore plutôt que celui d'une onde radio. Un capteur émet simultanément une onde radio et un signal sonore prédéfini. Les capteurs aux alentours reçoivent d'abord le message radio, lancent un minuteur et attendent le signal sonore. Lorsqu'il arrive, le temps de propagation de l'onde sonore est calculé et la distance estimée. Ces méthodes semblent donner de très bonnes précisions pour l'estimation des distances.

4.4 Modèle d'estimations des distances général

Le modèle que nous utilisons est une régression linéaire simple entre l'indicateur c_{ij} et la distance. Nous supposons notre ensemble de données d'échantillon composé de K -valeurs de RSSI pour chaque couple (i, j) de noeuds du réseau. Nous supposons que nous connaissons également les vraies distances d_{ij} .

La moyenne de cette valeurs sur K instants de temps est donnée par :

$$\bar{c}_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K c_{ij}}{K} = c_{ij} \quad (4.6)$$

Nous utilisons comme estimation de la distance entre i et j :

$$\hat{d}_{ij} = a * \bar{c}_{ij} + b \quad (4.7)$$

Où a et b doivent minimiser l'erreur E_{RMSE}^{dist} définie dans la section 4.5 ci-après. On peut montrer que la solution des moindres carrés est, si on considère :

$$\begin{cases} \bar{c} = \sum_{i,j} \bar{c}_{ij} \\ \text{et} \\ \bar{d} = \sum_{i,j} d_{ij} \end{cases}$$

$$a = \frac{\sum_{i,j} (\bar{c}_{ij} - \bar{c}) d_{ij}}{\sum_{i,j} (\bar{c}_{ij} - \bar{c}) \bar{c}_{ij}} \quad (4.8)$$

$$b = \bar{d} - a \cdot \bar{c} \quad (4.9)$$

4.5 Erreur du modèle d'estimation des distances

Pour quantifier la précision des différentes méthodes, nous utilisons la RMSE ([Root Mean Square Error, en français : racine de l'erreur quadratique moyenne](#)). On calcule la RMSE entre les distances estimées $\hat{d}_{ij}$ et les distances réelles par :

$$E_{RMSE}^{dist} = \sqrt{\frac{\sum_{1 \leq i,j \leq N} (\hat{d}_{ij} - d_{ij})^2}{N}} \quad (4.10)$$

Avec N est le nombre de noeuds dans le réseau, comme définit dans la section 4.1 ci-avant.

==> EXEMPLE D'APPLICATION SOUS MATLAB ==== :

==> Algorithme N°1 : Calcul des distances réelles inter noeuds capteurs
 $d(i,j), 1 \leq i,j \leq N$:

==> Introduire la surface du champs de déploiement des noeuds capteur :

$S = 20$

==> Introduire le nombre de noeuds capteurs déployés :

$N = 6$

==> Génération des coordonnées réelles pour l'axe des abscisses

$X = [x(i)], 1 \leq i \leq N$:

$X = [x(i)] =$
 13.693
 19.57
 4.0757
 11.866
 19.031
 5.2054

==> Génération des coordonnées réelles pour l'axe des ordonnées

$Y = [y(j)], 1 \leq j \leq N$:

$Y = [y(j)] =$
 10.294
 12.727
 8.0192
 9.7322
 15.009
 2.5239

==> Affichage des points de coordonnées pour chaque noeud capteur

$C(x(i), y(j)), 1 \leq i,j \leq N$:

$C(x(i), y(j)) =$
 13.693 10.294
 19.57 12.727
 4.0757 8.0192
 11.866 9.7322
 19.031 15.009
 5.2054 2.5239

==> Une autre façon d'affichage des points de coordonnées pour chaque noeud capteur
 $C(x(i), y(j))$, $1 \leq i, j \leq N$:

$C(x(i), y(j)) =$

13.693	19.57	4.0757	11.866	19.031	5.2054
10.294	12.727	8.0192	9.7322	15.009	2.5239

==> Affichage les positions des points de coordonnées pour chaque noeud capteur
 $C(x(i), y(j))$, $1 \leq i, j \leq N$:

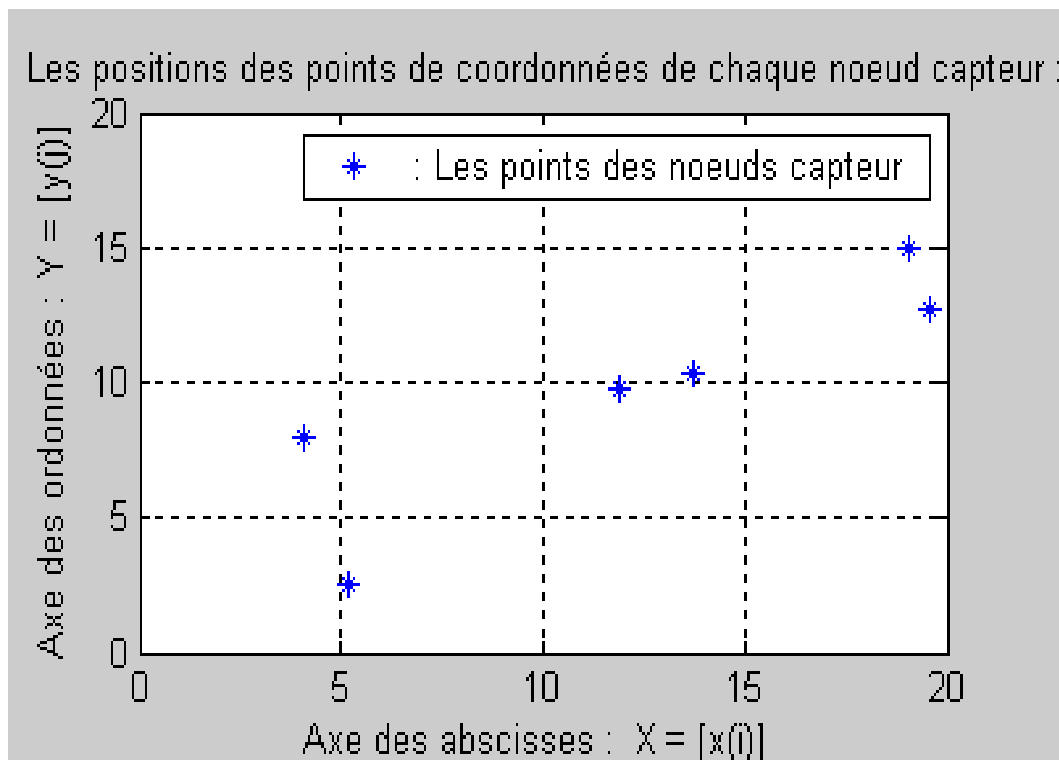


Figure 4.1 : Les positions des points de coordonnées de chaque noeud capteur.

==> La matrice des distances réelles inter noeuds capteurs déployés
 $d(i,j), 1 \leq i, j \leq N$:

$d(i,j) =$

0	6.361	9.8824	1.911	7.1229	11.507
6.361	0	16.194	8.2655	2.3453	17.619
9.8824	16.194	0	7.9765	16.508	5.6102
1.911	8.2655	7.9765	0	8.8987	9.8144
7.1229	2.3453	16.508	8.8987	0	18.629
11.507	17.619	5.6102	9.8144	18.629	0

==> Ces valeurs de distances peuvent être transformées en signal RSSI ($d(i,j)$) :
 $RssiR(d(i,j)) =$

0	23.794	21.243	30.757	23.139	20.362
23.794	0	18.383	22.277	29.572	17.894
21.243	18.383	0	22.483	18.271	24.521
30.757	22.277	22.483	0	21.85	21.283
23.139	29.572	18.271	21.85	0	17.572
20.362	17.894	24.521	21.283	17.572	0

==> Algorithme N°2: Calcul des distances estimées par le RSSI généré $RssiG(i,j)$:

$RssiG(i,j) =$

34.507	26.854	23.669	21.626	20.118	18.924	17.934
33.215	26.48	23.45	21.471	19.999	18.826	17.852
32.16	26.129	23.24	21.321	19.882	18.731	17.771
31.267	25.798	23.036	21.174	19.767	18.636	17.691
30.494	25.485	22.84	21.031	19.655	18.544	17.612
29.812	25.188	22.65	20.892	19.545	18.453	17.534
29.202	24.905	22.466	20.755	19.436	18.363	17.457
28.65	24.636	22.288	20.622	19.33	18.274	17.382
28.146	24.379	22.115	20.492	19.226	18.187	17.307
27.682	24.132	21.947	20.365	19.123	18.101	17.233
27.253	23.896	21.784	20.24	19.023	18.017	17.16

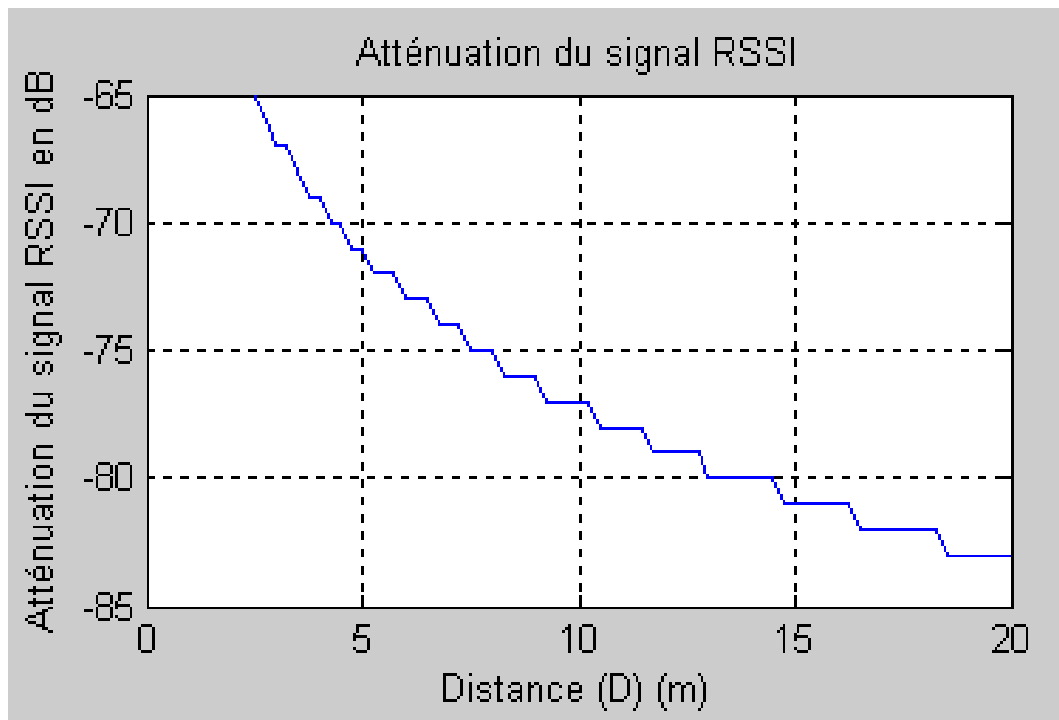


Figure 4.2 : Atténuation (Amoindrissement) du signal RSSI.

==> Estimation des distances par les données d'échantillon composé de K-valeurs de RSSI générées RssiG (Rssi-Estimé) :

RssiEs =

0	23.896	21.311	31.021	23.24	20.365
23.896	0	18.403	22.288	29.812	17.934
21.311	18.403	0	22.5	18.274	24.636
31.021	22.288	22.5	0	21.915	21.321
23.24	29.812	18.274	21.915	0	17.609
20.365	17.934	24.636	21.321	17.609	0

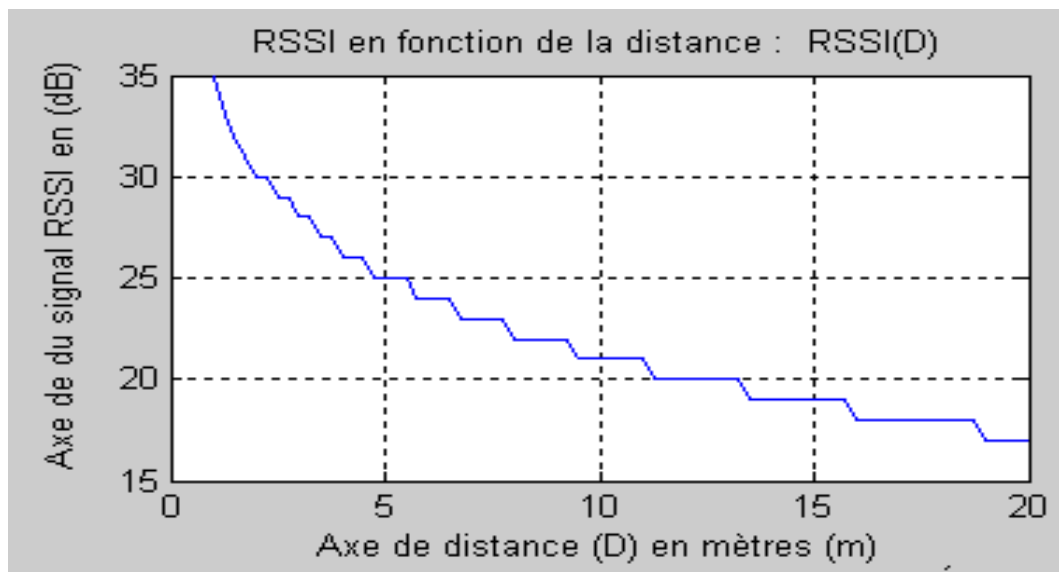


Figure 4.3 : RSSI en fonction de la distance RSSI(D).

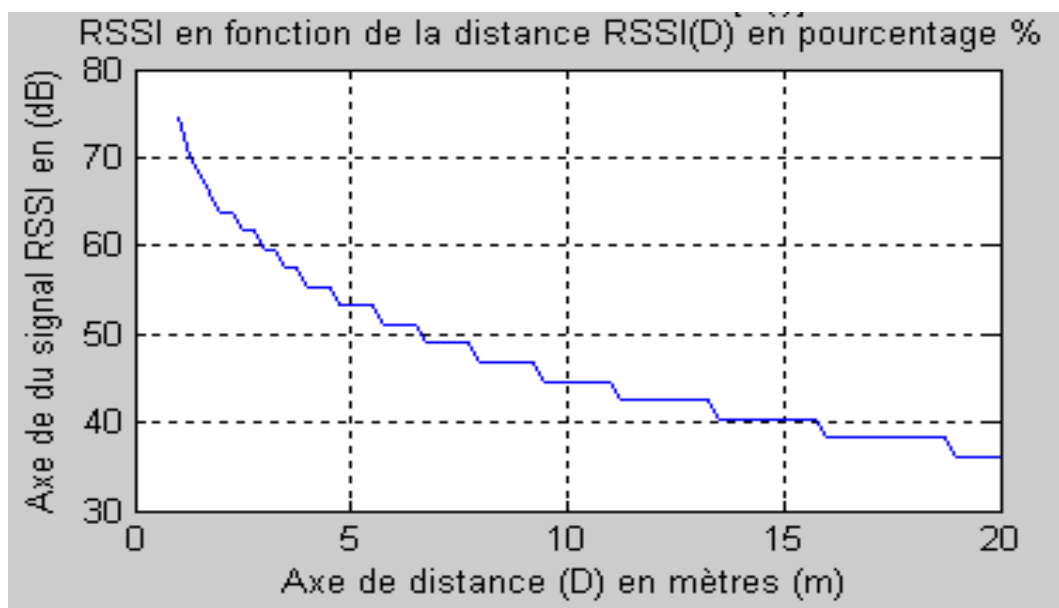


Figure 4.4 : RSSI en fonction de la distance RSSI(D) en pourcentage %.

==> La moyenne de cette valeur sur K-instants de temps de Rssi est donnée par MRssiEs comme suit :

MRssiEs =

0	22.089	22.089	22.089	22.089	22.089
22.089	0	22.089	22.089	22.089	22.089
22.089	22.089	0	22.089	22.089	22.089
22.089	22.089	22.089	0	22.089	22.089
22.089	22.089	22.089	22.089	0	22.089
22.089	22.089	22.089	22.089	22.089	0

==> La sommes totale des moyennes est donnée par SMRssiEs :

SMRssiEs = 331.33

==> La sommes totale des distances réelles entre les noeuds capteur déployés est donnée par Sd(i,j):

Sd = 148.64

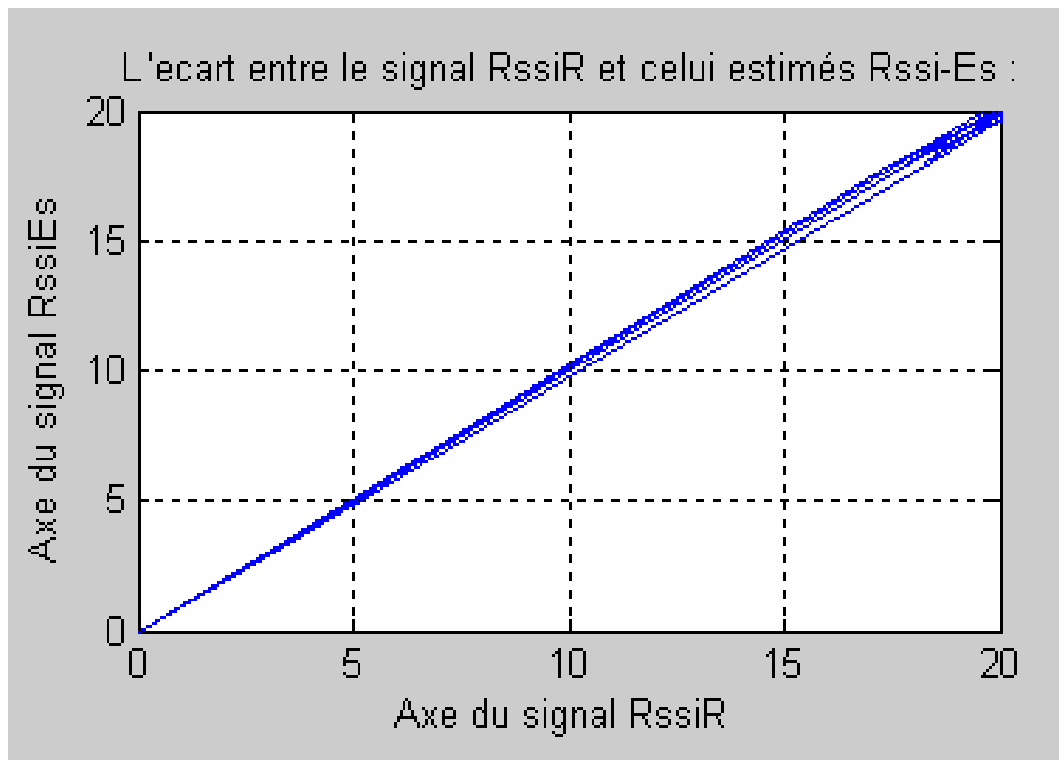


Figure 4.5 : L'ecart entre le signal RssiR et celui estimés Rssi-Es.

==> Calcul des coefficients "a" et "b" qui minimise l'Erreur Quadratique Moyenne EQM(i,j) :

==> La valeur de "a" est calculée comme suit :

$$a = 0.087395$$

==> La valeur de "b" est calculée comme suit :

$$b = 119.69$$

==> Les distances estimées entre les noeuds capteur est donnée par DEst(i,j) comme suit :

DEst(i,j) =

0	6.3626	9.884	1.9127	7.1246	11.508
6.3626	0	16.195	8.2671	2.3469	17.621
9.884	16.195	0	7.9781	16.51	5.6118
1.9127	8.2671	7.9781	0	8.9003	9.8161
7.1246	2.3469	16.51	8.9003	0	18.63
11.508	17.621	5.6118	9.8161	18.63	0

==> Erreur d'estimation par le biais de RSSI est donnée par Er(i,j):

Er(i,j) =

0	10.194	6.853	26.353	10.082	0.33193
10.194	0	2.0104	1.0856	24.011	3.9318
6.853	2.0104	0	1.7054	0.29572	11.485
26.353	1.0856	1.7054	0	6.5575	3.8144
10.082	24.011	0.29572	6.5575	0	3.7539
0.33193	3.9318	11.485	3.8144	3.7539	0

==> Erreur Quadratique Moyenne du modèle d'estimation est donnée par EQM(i,j) en pourcentage % :

EQM(i,j) =

0	0.067136	0.067136	0.067136	0.067136	0.067136
0.067136	0	0.067136	0.067136	0.067136	0.067136
0.067136	0.067136	0	0.067136	0.067136	0.067136
0.067136	0.067136	0.067136	0	0.067136	0.067136
0.067136	0.067136	0.067136	0.067136	0	0.067136
0.067136	0.067136	0.067136	0.067136	0.067136	0

Conclusion générale

LES réseaux de capteurs sans fils (RCSFs) constituent des sujets de recherche innovants pour diverses disciplines des sciences et techniques de l'information et de la communication, mais avec toutefois des contraintes spécifiques s'élevant en défis certains à relever. Parmi les problèmes posés à l'heure actuelle dans ce type de réseau, est le problème de localisation.

La localisation d'un noeud (objet, véhicule, personne, équipements informatiques,...) joue un rôle très important dans diverses applications, et elle est devenue un enjeu économique. L'information de positionnement est intéressante pour fournir aux utilisateurs des services spécifiques dépendant de leurs positions ou de réaliser des fonctions essentielles au réseau (une meilleure configuration de topologie de réseau) au lieux dans le quel ils se trouvent.

Le système de localisation le plus utilisé au monde pour les applications extérieures est le système GPS (Global Positioning System). En plus de la position, le système fournit en continu dans toutes les conditions météorologiques (avec une dégradation des performances) l'heure et la vitesse moyenne de déplacement.

Même si l'utilisation du GPS est limitée à l'extérieur et qu'il n'est pas très adapté aux Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) à cause de l'encombrement, du prix et de la consommation d'énergie des noeuds, son utilisation reste possible au niveau des ancres (beacons) qui ont, en général, plus de ressources et permettent ainsi aux autres noeuds de se localiser indirectement (par rapport aux ancres) en utilisant d'autres méthodes de mesure de localisation, à savoir : le TOA, la TDOA, l'AOA, et le RSSI.

Nous avons proposé dans ce mémoire une technique d'estimation de positions basée sur

la puissance du signal RSSI (Received Signal Strength Indication). La perte de puissance entre l'émetteur et le récepteur est proportionnelle à la distance parcourue. La mesure RSSI propose une estimation de la distance mais pas de son axe directeur.

Notre modeste travail fait l'objet de se rapprocher le plus possible à l'axe directeur du signal RSSI. pour cela nous avons commencé par la formulation du problème où nous avons défini le terrain d'intérêt connu afin de pouvoir connaître à tout moment, les coordonnées géographiques du capteur, d'où un réseau de capteurs a été déployé dans cet environnement. Ensuite parmi les techniques de localisation nous avons choisi celle du RSSI qui nécessite pas beaucoup de moyens pour sa mise en oeuvre. Cependant, pour modéliser le RSSI et les informations provenant des autres sources, nous avons opté pour le modèle qu'est une régression linéaire simple entre l'indicateur c_{ij} et la distance d_{ij} , qui est une des techniques d'optimisation de la Recherche Opérationnelle.

Pour quantifier la précision de ces méthodes, nous utilisons la RMSE (Root Mean Square Error, en français : racine de l'erreur quadratique moyenne), afin de calculer la RMSE entre les distances estimées $\hat{d}_{ij}$ et les distances réelles d_{ij} pour se rapprocher à la vraie distance du capteur cible. Enfin, nous avons terminé ce travail avec un exemple de calcul de la position du capteur cible par la technique RSSI.

Notre travail présenté dans ce mémoire, peut être étendu dans plusieurs directions, et ouvre des perspectives sur d'autres travaux :

- Valider notre processus d'estimation de positions et de distances avec un simulateur-MATLAB ;
- Mettre en pratique notre proposition dans une application réelle des réseaux de capteurs ;

Bibliographie

- [1] Akyildiz, I.F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks", IEEE Communications Magazine, August, 102-114(2002).
- [2] L. Gavrilovska ; S. Krco ; V. Milutinovic ; I. Stojmenovic ; R. Trobec "Application and Multidisciplinary Aspects of Wireless Sensor Networks", Springer, 2011.
- [3] B. Krishnamachari, "Networking Wireless Sensors", Cambridge University Press, 2005.
- [4] Ning Xu, "A survey of sensor network applications", IEEE communications magazine, vol 40, 2002.
- [5] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh et W. B. Heinzelman, "A Taxonomy of Wireless Micro-sensor Network Models", ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, vol. 6, no. 2, pp. 28-36, April 2002.
- [6] Ian F. AKYILDIZ, Mehmet Can VURAN, "A Wireless Sensor Network", John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [7] Feng WANG, Jiangchuan LIU, "Networked Wireless Sensor Data Collection : Issues, Challenges, and Approaches", IEEE, 2010.
- [8] Internet Engineering Task Force (IETF). Groupe de travail MANET (Mobile Ad-hoc Network). <http://www.ietf.org>
- [9] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. I. Cayirci. "A Survey on Sensor Networks". IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 8, pp. 102-116, August 2002.
- [10] Equipe de Get 2005 Capt'Ad-hoc. "Sensor networks : State of the Art". Technical Report, Telecom Paris, ENST Br, INT, INRIA, Mars 2006.
- [11] F. Brissaud, D. Charpentier, A. Barros et C. Bérenguer, "capteurs intelligents : nouvelles technologies et nouvelles problématiques pour la sûreté de fonctionnement", Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Lambda-Mu 16, Avignon : France (2008).

-
- [12] Vernon S. Somerset, "Intelligent and Biosensors", Edited by Vernon S. Somerset , Intech, January 2010.
 - [13] A. Montoya, D. C. Restrepo et D.A. Ovalle, "Artificial Intelligence for Wireless Sensor Networks Enhancement", InTech, 2010.
 - [14] Qinghua Wang et Ilangko Balasingham, "Wireless Sensor Networks - An Introduction" Wireless Sensor Networks : Application-Centric Design, Geoff V Merrett and Yen Kheng Tan (Ed.), ISBN : 978-953-307-321-7, InTech, 2010.
 - [15] Ben L. Titzer et J. Palsberg , "Nonintrusive Precision Instrumentation of Microcontroller Software" , ACM, New York, NY, ETATS-UNIS , Volume 40 Issue 7, Pages 59 - 68, July 2005.
 - [16] H. Karl et A. Willig, "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks", John Wiley & Sons, 2005.
 - [17] M.L. Messai. "Sécurité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil" Mémoire de Magistère en informatique. Option : génie informatique, Université de Béjaia, 2007/2008.
 - [18] R. Zitouni. "Routage à Basse Consommation d'Energie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil". Mémoire de Magistère en Informatique, Option : Informatique, Université de Béjaia, 2005/2006.
 - [19] M. Vossiek, L. Wiebking, P. Gulden, J. Wiegghardt, C. Hoffmann & P. Heide, "Wireless Local Positioning", IEEE microwave magazine, P 77, December 2003.
 - [20] A. Zemmar, "Tolérance aux Défaillances dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil". Mémoire de Magistère en Informatique. Option : Informatique, Université de Béjaia, Juin 2008.
 - [21] Gaurav Jolly, Mustafa C. Kusu, Pallavi Kokate et Mohamed Younis, "A Low-Energy Key Management Protocol for Wireless Sensor Networks", Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Computers and Communication ,(ISCC'03), IEEE COMPUTER SOCIETY, 2003.
 - [22] Shio Kumar Singh et al, "Applications, Classifications, and Selections of Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks", INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGIES (IJAEST), Vol No. 1, Issue No. 2, p : 85 - 95, 2003.
 - [23] V. R. Syrotiuk, B. Li, and A. M. Mielke, "Heterogeneous Wireless Sensor Networks" in Algorithms and Protocols for Wireless Ad hoc and Sensor Networks, A. Boukerche, ed., John Wiley & Sons, Inc., 2008, Chapter 2, pp. 21-50.
 - [24] A. Delye De Mazieux, V. Gauthier, M. Marot & M. Becker "Etat de l'Art sur les Réseaux de Capteurs". Technical report, Institut National de Télécommunication, Evry, France, Mars 2000.
 - [25] Gérard CHALHOUB, "Les Réseaux de Capteurs Sans Fil"
 - [26] Tseng et Al. "The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network", in Wireless Networks, Kluwer Academic Publishers. 8, 153-167, 2002.
 - [27] Y. Wang, G. Attebury et B. Ramamurthy, "A Survey of Security Issues in Wireless Sensor Networks", 2005.
 - [28] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler & K.S.J Pister, "System Architecture Direction for Programming Languages and Operating Systems". In Proceedings

- of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, page 93-104, 2000.
- [29] M. Aboelaze & F. Aloul "Current and Future Trends in Sensor et Works : A Survey". IEEE Communication Magazine, Jaune 2005.
 - [30] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, & E. I. Cayirci. "Wireless Sensor Networks : a survey". IEEE Computer Networks,38(4) :393-422, Marche 2001.
 - [31] F. Sivrikaya and B. Yener. "Time Synchronisation in Sensor Networks : a survey". IEEE Network, vol.18, no.4, pp.45-50, July/August 2004.
 - [32] J. Heidemann, F. Silva, C. Intanagonwiwat, R. Govinda, D. Estrin, and D. Ganesan. "Building Efficient Wireless Sensor Networks with low-level naming". In Proceeding of the 18th ACM Symposium on Operating Systems Principales, pages 146-159, ACM Press, 2001.
 - [33] B. Krishnamachari, D. Estrin, and S. Wicker. "Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks". In International Workshop of Distributed Event Based Systems (DEBS), pages 575-578, July 2002.
 - [34] S. Ratnasamy, B. Karp, L. Yin, F. Yu, D. Estrin, R. Govindan, and S. Shenker. "Ght : A Geographic Hash Table for Data-centric Storage". In Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, page 78-87, ACM Press, 2002.
 - [35] S. Ratnasamy, B. Karp, S. Shenker, D. Estrin, R. Govindan, L. Yin, and F. Yu. "Data-centric Storage in Sensor Nets with ght, A Geographic Hash Table". Mobile Networks and Applications, 8(4) : 427-442, 2003.
 - [36] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman. "Infrastructure Tradeoffs for Sensor Networks". In Proceedings of the 1 st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, page 49-58, ACM Press, 2002.
 - [37] K. Weniger and M. Zitterbart. "Adress Auto-configuration in Mobile Ad-hoc Networks : Current Approch and Future Directions". IEEE Network, 18(4) : page 6-11, July/August, 2004.
 - [38] Iwata, A. Chaing, C. C, G. Pei, M. Gerla, and Chen, T. W. "Scalable Routing Strategies for ad how Wireless Networks". IEEE Journal on Selected Areas in Communications pp 1369-1379, August, 1999.
 - [39] F. Martinic & L. Schwiebert. "Introduction to Wireless Sensor-King". Wayne State University, Detroit, Michigan.
 - [40] K. Heurtefeux & F. Valois. "Protocoles d'Auto-organisation : Une Etude Qualitative au cours de la Vie des Réseaux de Capteurs". ARES INRIA/CITI,INSA-Lyon, F-69621, France. 21 Octobre 2009.
 - [41] K. Romer et F. Mattern, "The Design Space of Wireless Sensor Networks", in IEEE Wireless Communications, 2006.
 - [42] S. Sentilles , "Architecture Logicielle pour Capteurs Sans Fils en Réseau", rapport de recherche, Université de Pau et des pays de l'Adour, juin 2006
 - [43] P. Corke ; T.Wark ; R.Jurdak, ; Wen Hu ; P.Valencia ; D.Moore, "Environmental Wireless Sensor Networks", Proceedings of the IEEE Volume : 98, Nov. 2010

-
- [44] E.M. Petriu, N.D. Georganas, D.C. Petriu, D. Makrakis et V.Z. Groza , "Sensor Based Information Appliances", IEEE Instrumentation Measurement Magazine, vol.3, no.4, p.31-35, December 2000.
 - [45] A. Milenkovic et Al, "Wireless sensor Networks for Personal Health Monitoring : Issues and an Implementation" Elsevier, 2006.
 - [46] Bluetooth SIG, "Specification of the Bluetooth System", Core, Version 1.1, Bluetooth SIG, [www.Bluetooth.com](http://www.bluetooth.com) .
 - [47] [http ://www.ieee802.org/11/](http://www.ieee802.org/11/).
 - [48] [http ://www.ieee802.org/16/](http://www.ieee802.org/16/).
 - [49] ZigBee Standards Organization ."ZigBee Specification", Document 053474r17, ZigBee Standards Organization, Janvier 2008.
 - [50] Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., "IEEE Std. 802.15.4-2003. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Persona Area Networks (LR-WPANs)". IEEE Press, October 1, 2003.
 - [51] www.zigbee.org.
 - [52] R. Jurdak, "Wireless Ad Hoc and Sensor Networks : A Cross-Layer Design perspective". University College Dublin, 2007.
 - [53] Abdelhakim HAMZI "Plateforme Basée Agents pour l'Aide à la Conception et la Simulation des Réseaux de Capteurs Sans Fil". Mémoire Magistère à l'Institut National de formation en Informatique (I.N.I) Oued-smar Alger.
 - [54] [http ://fr.wikipedia.org](http://fr.wikipedia.org).
 - [55] Abdallah Makhoul, "Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données", grade de DOCTEUR, l'Université de Franche-Comté, 14 novembre 2008.
 - [56] PRIYANTHA (N.), BALAKRISHNAN (H.), DEMAINE (E.) et TELLER (S.), "Anchor free distributed localization in sensor networks", MIT Laboratory for Computer Science, Tech. Rep. 892, April 2003.
 - [57] COSTA (J. A.), PATWARI (N.) et O.HERO (A.), "Distributed multidimensional scaling with adaptive weighting for node localization in sensor networks", IEEE/ACM Trans. Sensor Networks, submitted May 2004, (revised January 2005).
 - [58] HE (T.), HUANG (C.), BLUM (B. M.) et al., "Range-free localization schemes for large scale sensor networks", Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking, 2003, p. 81-95.
 - [59] LANGENDOEN (K.) et REIJERS (N.), "Distributed localization in wireless sensor networks : a quantitative comparison". Computer Networks, vol. 43, no 4, November 2003, p. 499-518.
 - [60] Messaoud Belloula ; "La géolocalisation dans les réseaux de capteurs sans fil ; Etude de cas : Utilisation en agriculture".Thèse de Magistère ; Université Hadj Lakhder-Batna.
 - [61] Azzedine Boukerche, "Algorithms And Protocols For Wireless Sensor Networks". Wiley, ISBN : 978-0-471-79813-2, 11-2008.
 - [62] Ivan Stojmenovic, "Handbook Of Sensor Networks : Algorithms And Architectures". Wiley-Intersciencene, ISBN : 978-0-471-68472-5, 10-2005.

- [63] Holger Karl, Andreas Willig, "Protocols And Architectures For Wireless Sensor Networks". Wiley, ISBN : 978-0-470-09510-2, 04-2005.
- [64] Jeffrey Hightower and Gaetano Borriello, "Location Systems for Ubiquitous Computing". IEEE Computer Journal, VOL. 34 N^o 8, pp. 57-66, 2001.
- [65] C. SAAD "Quelques contributions dans les réseaux de capteurs sans fil : Localisation et Routage", thèse en vue de l'obtention du doctorat, Université d'Avignon et des pays vaucluse, juillet 2008.
- [66] E. Ermel, "Localisation et routage géographique dans les réseaux sans fil hétérogènes". Phd. thesis, LIP6, Pierre et Marie Curie Univ., Paris, France, 2001.
- [67] A.H. Sayed, A. Tarighat, and N. Khajehnouri, "Network-based wireless location". IEEE Signal Processing Magazine page 24-40, July 2005.
- [68] Y. Wang, X. Jia, and H.K. Lee, "An indoors wireless positioning system based on wireless local area network infrastructure". The 6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Services, Melbourne, Australia 22-25 July 2003.
- [69] A. Kushki, K. Plataniotis, A. Venetsanopoulos, and C. Regazzoni, "Radio map fusion for indoor positioning in wireless local area networks", 8th International Conference on Information Fusion, July 2005.
- [70] Guide Technique. RFID, "La solution industrielle qui tend à s'imposer". Magazine Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel, Novembre 2007.
- [71] G. Czopik and A. Kawalec. "A hybrid aoa-tdoa signal source localization algorithm". In 17th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON 2008, pages 1-4, 19-21 May 2008. 9.
- [72] Amundson I., Koutsoukos X. D., "A Survey on Localization for Mobile Wireless Sensor Networks". International Workshop on Mobile Entity Localization (MELT), septembre 2009.
- [73] Multilatération <http://en.wikipedia.org/wiki/multilateration> (Accès juin 2011).
- [74] Projet OCELO. "Objets communicants-expérimentations technologiques et spécifications". Technical report, ICP-INPG, Grenoble, Avril 2006. 7, 8, 9.
- [75] D. Niculescu and B. Nath, "Ad Hoc Positioning System (APS) using AOA". In Proceedings of INFOCOM 2003, San Francisco, CA, 2003, pp. 1734-1743
- [76] Mihaela Cardei, Ionut Cardei, Ding-Zhu Du, "Resource Management in Wireless Networking". Springer, ISBN : 978-0-387-23807-4, 01-2005.
- [77] V. Ramadurai and M. L. Sichitiu. "Localization in wireless sensor networks : A probabilistic approach". In Proceedings of the 2003 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2003), Las Vegas, NV, June 2003, pp. 275-281.
- [78] Azzedine Boukerche, "Algorithms And Protocols For Wireless Sensor Networks". Wiley, ISBN : 978-0-471-79813-2, 11-2008.
- [79] S. Simic and S. Sastry, "Distributed localization in wireless ad hoc networks". Technical Report UCB/ERL M02/26, UC Berkeley, 2002.
- [80] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, "GPS-less Low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices". IEEE Personal Communications Magazine, 7(5) :28-34, October 2000.

-
- [81] E. Ermel, A. Fladenmuller, G. Pujolle & A. Cotton, "Estimation de positions dans les réseaux sans fil hybrides". Laboratoire Informatique de paris 6, Université de Pierre et Marie Curie, Paris, France.
 - [82] J. Blumental, R. Grossmann, F. Glotowski & D. Timmermann, "Weighted centroid localization in zigbee based sensor networks". CELISCA, Center for life science automation, université Rostock.
 - [83] M. Cypriani, "Géopositionnement Wi-Fi autocalibré en milieu hétérogène". Université de Franche-Comté, décembre 2012.
 - [84] DOUMA Nabila, ELHAMMOUTI Mohamed, "La localisation dans un réseau de capteurs". PROJET 1ere Année Master RTM, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.
 - [85] R. Manzoor, "Energy efficient localization in wireless sensor networks using noisy measurements". [M.S. thesis], 2010.
 - [86] A. Youssef and M. Youssef, "Ataxonomy of localization schemes for wireless sensor networks", in Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN '07), pp. 444-450, Las Vegas, Nev, USA, 2007.
 - [87] T. S. Rappaport, "Wireless communications, principles and practice". Prentice Hall, 1996.
 - [88] T. S. Rappaport. "Wireless Communications, Principles & Practices". Prentice Hall, 1999.
 - [89] KLEINROCK (L.) et SILVESTER (J.), "Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number". In IEEE National Telecommunications Conference, 1978, p. 431-435.
 - [90] NAGPAL (R.), SHROBE (H.) et BACHRACH (J.), "Organizing a global coordinate system from local information on an ad hoc sensor network". In Proc. International Workshop on Information Processing in Sensor Networks, IPSN, 2003, p. 553.
 - [91] Frédéric Evennou. "Techniques et technologies de localisation avancées pour terminaux mobiles dans les environnements indoor". PhD thesis, UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I, Janvier 2007. 1, 2, 5, 7, 11, 20, 21, 24.
 - [92] Z. Sahinoglu, S. Gezici, and Ismail Guvenc. "Ultra-Wideband Positioning Systems : Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols". Cambridge University Press, 2008. 10, 31, 33, 36.
 - [93] Wei-Wei Ji, Zhong Liu "An improvement of DV-HOP algorithm in Wireless Sensor Networks". International conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, septembre 2006.
 - [94] L. Gui, A. Wei, T. Val, "A Two-level Range-free Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks". WiCom, septembre 2010.
 - [95] T. He, C. Huang, B.M. Blum, J.A. Stankovic, and T. Abdelzaher. "Range-free localization schemes for large scale sensor networks". ACM Press New York, NY, USA, 2003.
 - [96] N. Bulusu. "Self-Configuring Location Systems". PhD thesis, University of California, 2002.
 - [97] K. Langendoen and N. Reijers. "Distributed localization in wireless sensor networks : a quantitative comparison". Computer Networks, 43(4) :499-518, 2003.

- [98] N.B. Priyantha, H. Balakrishnan, E. Demaine, and S. Teller. "Anchorfree distributed localization in sensor networks". Proc. 1st Inter. Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), pages 340-341, 2003.
- [99] J.A. Costa, N. Patwari, and A.O. Hero III. "Distributed weighted multidimensional scaling for node localization in sensor networks". ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2(1) :39-64, 2006.
- [100] D. Moore, J. Leonard, D. Rus, and S. Teller. "Robust distributed network localization with noisy range measurements". Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, pages 50-61, 2004.

Résumé

CE mémoire s'inscrit dans le cadre général de la localisation dans les réseaux de capteurs sans fils (RCSFs) en 2-D. Le terme localisation est utilisé pour faire référence à un système permettant de déterminer l'emplacement d'un objet. La localisation des noeuds capteurs est l'un des services les plus importants, alors que, l'objectif de la localisation dans les RCSFs déployés de manière aléatoire consiste à déterminer les coordonnées physiques ou géographiques d'un groupe de noeuds capteurs. Une nouvelle classification des approches de localisation dans les RCSFs est fondée sur l'utilisation d'une ancre mobile au lieu de plusieurs ancres statiques équipés par un système GPS. Il existe deux types d'approches, aussi appelées des stratégies de localisation, qui sont : approches directe, et approche indirecte. L'approche directe, c'est la localisation absolue, cet approche peut même être classifiée en deux types de techniques : technique de configuration manuelle, et technique de localisation basée sur le système GPS(Global Positioning System), est le système le plus utilisé à l'extérieur, à l'échelle mondiale, et est de loin. L'approche indirecte, c'est la localisation relative, cet approches indirecte a été introduite pour surpasser les inconvénients des techniques de localisation basées sur le GPS. En fin, le processus de localisation pour cet approche peut même être classifiée en deux types de techniques de mesures qui sont : les méthodes de mesures basées (RANGE-BASED), et les méthodes de mesures libres (RANGE-FREE).

Mots Clés : Localisation, Estimation, Modélisation, Optimisation, RCSFs, GPS

Abstract

THIS memory lies within the general scope of the localization in the Wireless Sensors Networks (WSNs) in 2-D. The localization term is used to refer to a system making it possible to determine the site of an object. The localization of the nodes sensors is one of the most significant services, whereas, the objective of the localization in WSNs deployed in a random way consists in determining the physical or geographical coordinates of a group of nodes sensors. A new classification of the approaches of localization in WSNs founded on the use of a mobile anchor instead of several static anchors is equipped by a system GPS. There are two types of approaches, so called strategies of localization, which is : approaches direct, and approaches indirect. The direct approach, it's the absolute localization, this approach can be even classified in two types of techniques : technique of manual configuration, and technique of localization based on system GPS (Total Positioning System), is the system more used outside, on a worldwide scale, and is by far. The indirect approach, it is the relative localization, this approaches indirect was introduced to exceed the disadvantages of the techniques of localization based on the GPS. In end, the process of localization for this approach can be even classified in two types of measurement techniques which are : RANGE-BASED methods, and RANGE-FREE methods.

Key Words : Localization, Estimate, Modeling, Optimization, WSNs, GPS