

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عمار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI LAGHOUAT



FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE
THÈSE PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PAR:
Benkouider Sara

Pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT en Sciences
Spécialité: Informatique
THÈME

Localisation des nœuds mobiles dans les environnements hétérogènes

Soutenu le 06/02/2020 devant le jury composé de:

Mme Hadda BOUZOUAD	Professeur	Université de Laghouat	Présidente
Mr Abdelmalik BACHIR	Professeur	Université de Biskra	Examineur
Mr Youcef OUINTEN	Professeur	Université de Laghouat	Examineur
Mr Abderrahmane LAKAS	Professeur	Université Al Ain (UAEU)	Examineur
Mr Mohamed Bachir YAGOUBI	Professeur	Université de Laghouat	Rapporteur
Mr Nasreddine LAGRAA	Professeur	Université de Laghouat	Co-Rapporteur

N° d'ordre :/2020-D/INF

Dédicace

Cette thèse est dédiée particulièrement à la mémoire de mon cher père, qui est décédé avant d'achever ce travail. Il m'a toujours poussé et motivé dans mes études.

Sans lui, ce travail n'aurait vraisemblablement jamais abouti. Cette thèse représente donc l'aboutissement du soutien et des encouragements qu'il m'a prodigué tout au long de ma vie.

À ma chère mère, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour son amour, son soutien, sa patience et son sacrifice tout au long de mes études, que DIEU la protège toujours.

À mes sœurs, mes frères et toute la famille.

Sara

Remerciements

Je tiens à remercier mon Dieu, le tout puissant, de m'avoir donné la santé, le courage, la volonté et la patience jusqu'à l'achèvement de ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance et mes vifs remerciements à mon directeur de thèse Pr. Mohamed Bachir YAGOUBI, Professeur à l'Université de Laghouat, pour m'avoir fait confiance pour la troisième fois. Je le remercie également pour son accueil, son aide, ses conseils précieux et sa disponibilité sans faille malgré son emploi du temps très chargé.

Je tiens à exprimer tous mes sincères remerciements à mon Co-directeur de thèse, Pr. Nasreddine LAGRAA, Professeur à l'Université de Laghouat, pour ses encouragements dans mes moments de doute et la confiance qu'il m'a accordé m'ont permis de mener à bien ce travail. Je tiens encore à lui exprimer ma profonde gratitude pour leur lecture approfondie de cette thèse et leurs remarques judicieuses qui m'ont été très précieuses.

Je remercie également Mme Hadda BOUZOUAD Professeur à l'Université de Laghouat, d'avoir acceptée d'examiner ce travail et d'assurer la présidence du jury, ainsi que Messieurs Pr. Youcef OUINTEN Professeur à l'Université de Laghouat, et Pr. Abderrahmane LAKAS Professeur à l'Université Al Ain (UAEU) et Pr. Abdelmalik BACHIR Professeur à l'université de Biskra, d'avoir participé au jury et acceptés de rapporter cette thèse.

Un merci particulier à Pr. Abderrahim BENSLIMANE Professeur à l'Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, de m'avoir accueillie dans son Laboratoire d'Informatique (LIA) et pour leurs conseils qui ont participé à la simulation des réseaux de capteurs sans fil.

J'aimerais également remercier tous mes collègues du département d'Informatique et du Laboratoire d'Informatique et de Mathématique (LIM) de l'Université de Laghouat.

Je tiens à remercier tout particulièrement mes très chers parents pour leur soutien et leurs encouragements depuis mon enfance jusqu'à ce jour, sans oublier mes sœurs, mes frères et toute la famille.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Sara

Résumé

La nature décentralisée des réseaux MANET, les rend adaptés à une multitude d'applications où on ne peut pas s'appuyer sur des nœuds centraux. La tâche principale de la plupart de ces applications est la détection d'un événement (détection de feu de forêt, détection d'accidents, détection de situations dangereuse, etc.) et la diffusion des messages d'alerte. Cependant, il ne suffit pas seulement de détecter l'événement mais il faut également connaître l'endroit précis de son déroulement. Par conséquent, localiser l'origine et la source de l'information reçue joue un rôle vital pour la compréhension de l'environnement.

Dû à l'importance de la localisation dans les applications des réseaux MANET et dépend de leurs environnements, trois classes de solutions différentes ont été proposées: (i) solution où aucun nœud n'est équipé d'un GPS, (ii) solution où certains nœuds sont équipés de GPS et (iii) solution où tous les nœuds sont équipés de GPS. Les travaux de cette thèse présentent des contributions dans les trois classes de solutions.

Dans la première classe où aucune information GPS n'est disponible, nous proposons une nouvelle technique de localisation relative qui vise à établir les positions des nœuds dans un réseau Ad hoc de drones (FANET). Elle est basée essentiellement sur une technique d'établissement des positions relatives des nœuds voisins en fonction des distances mesurées entre les drones dans un environnement intérieur. Les distances entre les nœuds sont calculées à l'aide de la puissance du signal reçu (RSSI).

Pour la deuxième classe et dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), nous présentons deux nouvelles approches de localisation des nœuds capteurs à l'aide d'un nœud mobile (ancrage mobile): la première vise à minimiser la longueur de la trajectoire de l'ancrage mobile, à déterminer la position des ancres virtuelles et à améliorer la précision des positions. La deuxième vise à définir une trajectoire optimale de l'ancrage mobile, à minimiser le nombre de messages reçus et à réduire la consommation d'énergie des nœuds capteurs.

Dans la dernière classe où chaque nœud est équipé de GPS, nous proposons une nouvelle technique de correction des positions des nœuds dans les réseaux de véhicules (VANET). Elle est basée uniquement sur un réseau de neurones dont le but est d'obtenir au moins les mêmes performances que les techniques existantes avec des complexités du temps de calcul plus faibles.

L'analyse analytique et les résultats de la simulation montrent l'efficacité de toutes nos propositions et cela pour plusieurs paramètres de simulation et dans différents environnements.

Mots-clés: MANET, RCSEF, VANET, FANET, Localisation, GPS, Ancre mobile, RSSI.

Abstract

The decentralized nature of MANET networks makes them suitable for a multitude of applications where central nodes cannot be relied on. The main task of most of these applications is to detect an event (forest fire detection, accident detection, detection of dangerous situations, etc.) and to disseminate warning messages. However, it is not enough to detect the event, but also to know the precise location of its course. Therefore, locating the origin and source of the information received plays a vital role in understanding the environment.

Due to the importance of localization in MANET networks applications and depends on their environments and type of nodes, three different classes of solutions have been proposed: (i) solutions where no node is equipped with a GPS, (ii) solutions where some nodes are equipped with GPS, and (iii) solutions where all nodes are equipped with GPS.

In this thesis, we present our contribution in each class.

In the first class where no GPS information is available, we propose a new relative localization technique aimed at establishing node positions in a flying ad hoc networks (FANET). It is based essentially on a technique of establishing the relative positions of nearby nodes as a function of the measured distances between drones, in an indoor environment. The distances between nodes are calculated using the received signal strength indication (RSSI).

For the second class and in wireless sensor networks (WSN), we present two new approaches aiming at locating sensor nodes using a mobile node (mobile beacon). The first aims to reduce the length of the mobile beacon trajectory, to determine the position of virtual beacons and to improve the accuracy of positions. The second aims to define an optimal trajectory of the mobile beacon, to minimize the number of messages received and to reduce the energy consumption of the sensor nodes.

In the last class where each node is equipped with GPS, we propose a new technique for correcting node positions in vehicular ad hoc networks (VANET). It is based solely on a neural network whose purpose is to obtain at least the same performance as existing techniques with lower computational time complexities.

The analytical analysis and simulation results show the efficiency of all our contributions for several simulation parameters and in different environments.

Keywords: MANET, WSN, VANET, FANET, Localization, GPS, Mobile beacon, RSSI.

ملخص

الطبيعة اللامركزية للشبكات المتنقلة (MANET)، تجعلها تتكيف مع العديد من التطبيقات التي لا يمكننا الاعتماد فيها على عقد مركزية. المهمة الرئيسية لمعظم هذه التطبيقات هي الكشف عن حدث (اكتشاف حريق الغابات، الكشف عن الحوادث، و الكشف عن المواقع الخطيرة) وتوزيع رسائل التحذير. ولذلك لا يكفي اكتشاف الحدث فحسب، بل يجب أيضا معرفة مكان وقوعه. وبالتالي، فإن تحديد مصدر المعلومات الواردة و موقعها يعتبر أساسيا في فهم البيئة.

نظرا لأهمية تحديد الموقع في تطبيقات الشبكات المتنقلة، تم اقتراح ثلاث فئات من الحلول المختلفة: (1) حلول حيث لا توجد أي عقدة مجهزة بنظام تحديد المواقع العالمي (GPS)، (2) حلول حيث يتم فيه تجهيز بعض العقد بنظام تحديد المواقع العالمي (GPS)، (3) حلول يتم فيه تجهيز جميع العقد بنظام تحديد المواقع العالمي (GPS). في هذه الأطروحة نقدم المساهمات المقترحة في كل فئة.

في الفئة الأولى حيث لا تتوفر معلومات نظام تحديد المواقع العالمي، نقترح طريقة جديدة نسبية تهدف إلى تحديد مواقع العقد في شبكة الطائرات بدون طيار (FANET)، ترتكز أساسا على تقنية تحديد المواقع النسبية للعقد المجاورة وفقا للمسافات المقاسة بين الطائرات بدون طيار في بيئة داخلية حيث يتم حساب المسافات بين العقد بواسطة قوة الإشارة الواردة (RSSI).

بالنسبة للفئة الثانية وفي شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSN)، نقدم طريقتين لتحديد موقع العقد بواسطة عقدة متنقلة: تهدف الأولى إلى تقليل طول مسار العقدة المتنقلة وتحسين دقة المواقع. أما الثانية فتهدف إلى تحديد المسار الأمثل للعقدة المتنقلة، تقليل عدد الرسائل المستلمة وتقليل استهلاك الطاقة لأجهزة الاستشعار اللاسلكية.

في الفئة الأخيرة التي تكون فيها كل عقدة مجهزة بنظام تحديد المواقع العالمي، نقترح طريقة جديدة لتصحيح مواقع العقد في شبكات المركبات (VANET). تعتمد هذه الطريقة على شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية التي يكون الغرض منها الحصول على الأداء نفسه على الأقل للتقنيات الموجودة مع تعقيدات أقل لوقت الحساب.

يظهر التحليل ونتائج المحاكاة فعالية جميع مقترحاتنا، و هذا مع العديد من المعايير و في مختلف البيئات.

كلمات مفتاحية: شبكات متنقلة، شبكة الطائرات بدون طيار، شبكة الاستشعار اللاسلكية، شبكة المركبات، تحديد الموقع، نظام تحديد المواقع العالمي.

Table des matières

1	Introduction générale	1
1.1	Présentation du contexte	2
1.1.1	Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)	4
1.1.2	Les réseaux de véhicules (VANET)	6
1.1.3	Les réseaux de drones	8
1.2	Problématique	14
1.3	Objectifs et contributions	16
1.4	Organisation de la thèse	17
2	Localisation : Systèmes et techniques	19
2.1	Introduction	21
2.2	Techniques de localisation	21
2.2.1	Estimation de distance/angle	22
2.2.1.1	Indicateur de puissance du signal reçu (RSSI)	23
2.2.1.2	Temps de parcours (ToA)	24
2.2.1.3	Différence du temps d'arrivée (TDoA)	25
2.2.1.4	Angle d'arrivée (AoA)	26
2.2.1.5	Le nombre de sauts (RHC)	26
2.2.1.6	Synthèse	27
2.2.2	Calcul de la position	27
2.2.2.1	Trilatération et Multilatération	28

2.2.2.2	Triangulation	29
2.2.2.3	Position centrale (Centre de gravité)	29
2.2.2.4	MinMax	30
2.2.2.5	Synthèse	30
2.2.3	Algorithme de localisation	31
2.3	Systèmes de localisation	31
2.3.1	Système de positionnement par satellite (GPS)	32
2.3.1.1	Positionnement absolu (GPS)	33
2.3.1.2	Positionnement relatif (DGPS)	34
2.3.1.3	Les erreurs du GPS	34
2.3.2	Systèmes de navigation inertielle (INS)	35
2.3.3	Map matching	36
2.3.4	Localisation cellulaire	36
2.3.5	Traitement d'image/vidéo	37
2.3.6	Localisation relative	37
2.3.7	Fusion de données	38
2.3.8	Synthèse	38
2.4	Autres systèmes de positionnement par satellites	39
2.4.1	GLONASS	39
2.4.2	GALILEO	39
2.4.3	BEIDOU (Compass)	40
2.5	Conclusion	40
3	Localisation relative des nœuds mobiles	42
3.1	Introduction	43
3.2	Localisation relative	43
3.2.1	Localisation relative dans les réseaux de capteur sans fil	44
3.2.2	Localisation relative dans les VANET	45
3.2.3	Localisation relative dans les réseaux Ad hoc de drones	47
3.3	RLSUAV : Relative Localization in a Swarm of UAVs	50
3.3.1	Détection des voisins à 1-saut et à 2-sauts	50
3.3.2	Détermination du système de positionnement local	51
3.3.3	Détermination du système de positionnement global	54
3.4	Simulation et analyses	55
3.4.1	Nombre de messages reçus	56

3.4.2	Taux de réussite	57
3.4.3	Erreur de localisation	58
3.5	Conclusion	59
4	Localisation à l'aide d'un nœud mobile	60
4.1	Introduction	62
4.2	Importance de la localisation dans les RCSF	63
4.3	Algorithmes de localisation dans les RCSF	63
4.4	Algorithmes de localisation à l'aide d'une ancre mobile dans les RCSF . . .	64
4.5	Les trajectoires des ancres	65
4.5.1	Trajectoire aléatoire (RWP)	65
4.5.2	Trajectoire de Scan	66
4.5.3	Trajectoire de Double Scan	67
4.5.4	Trajectoire de Hilbert	67
4.5.5	Trajectoire de Cercles	68
4.5.6	Trajectoire de LMAT	68
4.5.7	Synthèse	69
4.6	Localisation avec une ancre-Hilbert	70
4.6.1	Définitions	70
4.6.2	Principe de la localisation avec une ancre-Hilbert	73
4.7	Nos techniques d'optimisation de la trajectoire de Hilbert	73
4.7.1	La zone de couverture Z	73
4.7.2	OHPL : Optimization of Hilbert Path Length	74
4.7.2.1	Trajectoire de l'ancre mobile	75
4.7.2.2	Longueur de trajectoire (L_2)	77
4.7.2.3	Efficacité de trajectoire	78
4.7.2.4	Nombre d'ancres virtuelles (N_2)	78
4.7.3	OHPE : Optimization of Hilbert Path Energy	79
4.7.3.1	Trajectoire de l'ancre mobile	79
4.7.3.2	Longueur de trajectoire (L_3)	81
4.7.3.3	Efficacité de trajectoire	81
4.7.3.4	Nombre d'ancres virtuelles (N_3)	82
4.8	Simulation et analyses	82
4.8.1	Longueur de trajectoire et nombre d'ancres virtuelles	83
4.8.2	Nombre de messages reçus	84

4.8.3	Énergie consommée	85
4.8.4	Erreur de localisation	86
4.8.5	Taux de réussite de localisation	87
4.8.6	Environnement multi-trajets	88
4.9	Conclusion	90
5	Correction des positions des nœuds dans un réseau fortement mobile	91
5.1	Introduction	93
5.2	Importance de la localisation dans les réseaux VANET	93
5.3	Techniques de correction des positions des nœuds dans les réseaux VANET	95
5.3.1	Méthodes d'estimation	96
5.3.2	Méthodes intelligentes	97
5.3.3	Méthodes hybrides	98
5.4	RISC : Reduced Integration Scheme Complexity	99
5.4.1	Phase de revue et d'évaluation	100
5.4.1.1	Unité de fusion GPS/INS	100
5.4.1.2	Unité de détection de multi-trajets (MDU)	102
5.4.1.3	Unité de correction de la localisation (LEU)	102
5.4.2	Phase d'apprentissage	102
5.4.3	Phase de correction	103
5.5	Étude de complexité temporelle	104
5.5.1	La complexité temporelle de IVCAL	104
5.5.2	La complexité temporelle de notre approche RISC	105
5.6	Simulation et analyses	105
5.7	Conclusion	110
6	Conclusion générale et perspectives	111
6.1	Conclusion	112
6.2	Perspectives	115
	Bibliographie	116
	Annexes	127
A	Filtre de Kalman et ses dérivées	128
A.1	Filtre de Kalman (Kalman Filter (KF))	128

A.1.1	Étape de prédiction	130
A.1.2	Étape de correction	130
A.1.3	Étape d'initialisation	131
A.2	Filtre de Kalman étendu (Extended Kalman Filter (EKF))	131
A.3	Filtre de Kalman inodore (Unscented Kalman Filter (UKF))	133
B Réseaux de neurones artificiels		134
B.1	Introduction	134
B.2	Définitions	135
B.2.1	Neurone formel	135
B.2.2	Fonction d'activation	136
B.3	Architecture des réseaux de neurones	137
B.3.1	Réseaux de neurones non bouclés	137
B.3.2	Réseaux de neurones bouclés	138
B.4	Traitement de l'information par réseau de neurones	139
B.4.1	Phase d'apprentissage	139
B.4.2	Phase de généralisation	140
B.5	Algorithme de la rétro-propagation du gradient d'erreur	140
B.5.1	Présentation de l'algorithme	141

Table des figures

1.1	Architecture d'un réseau de capteurs	5
1.2	Types de communication dans un réseau VANET	6
1.3	Architectures de communication pour une flotte de drones	9
2.1	Composition d'un système de localisation	22
2.2	Techniques d'estimation de distance/angle	23
2.3	Techniques de calcul de la position	28
2.4	Systèmes de localisation des nœuds mobiles	32
2.5	Principe de positionnement absolu (GPS) et relatif (DGPS)	33
3.1	Diffusion des messages REQ	50
3.2	Diffusion des messages REP et REP_N	51
3.3	Choix des nœuds A, B et C	52
3.4	Positions des nœuds A et B	52
3.5	Position du nœud C (Trilatération)	53
3.6	Position du nœud D (Multilatération)	55
3.7	Nombre de messages reçus en fonction de nombre de nœuds	56
3.8	Nombre de message reçus dans un environnement multi-trajets	56
3.9	Taux de réussite en fonction de nombre de nœuds	57
3.10	Taux de réussite dans un environnement multi-trajets	57
3.11	Erreur de localisation en fonction de nombre de nœuds	58
3.12	Erreur de localisation dans un environnement multi-trajets	58

4.1	Trajectoire aléatoire (RWP)	66
4.2	Trajectoire de Scan	66
4.3	Trajectoire de Double Scan	67
4.4	Trajectoire de Hilbert	67
4.5	Trajectoire de Cercles	68
4.6	Trajectoire de LMAT	68
4.7	Courbe de Hilbert d'ordre 2	71
4.8	Carré unité US	72
4.9	La zone de couverture Z	74
4.10	Notre trajectoire ABCD de l'ancre dans un carré unité	75
4.11	Notre trajectoire $A'B'C'$ dans un carré unité	79
4.12	Longueur de trajectoire	83
4.13	Nombre d'ancre virtuelle	83
4.14	Nombre de messages reçus en fonction de la portée de transmission	84
4.15	Nombre de messages reçus en fonction de nombre de nœuds	84
4.16	Énergie consommée en fonction de la portée de transmission	85
4.17	Énergie consommée en fonction de nombre de nœuds	85
4.18	Erreur de localisation en fonction de la portée de transmission	87
4.19	Erreur de localisation en fonction de nombre de nœuds	87
4.20	Taux de réussite en fonction de la portée de transmission	88
4.21	Taux de réussite en fonction de nombre de nœuds	88
4.22	Taux de réussite de localisation dans différents environnements	89
4.23	Erreur de localisation dans différents environnements	89
5.1	Architecture de la technique IVCAL	100
5.2	Intégration GPS/INS en utilisant le Filtre de Kalman	101
5.3	Unité de détection de multi-trajets (MDU)	102
5.4	Schéma de la phase d'apprentissage	103
5.5	Schéma de la phase de correction	103
5.6	Comparaison des performances de notre technique RISC avec IVCAL en environnement ouvert	107
5.7	Comparaison des performances de RISC avec IVCAL en environnement multi-trajets	107
5.8	Comparaison des performances de RISC avec IVCAL en environnement hétérogène	108

5.9 Erreur de position dans un environnement hétérogène	109
5.10 Erreur entre la position de RISC et de IVCAL dans un environnement hétérogène	109
A.1 Principe du filtre de Kalman (KF)	130
A.2 Principe du filtre de Kalman étendu (EKF)	132
B.1 Neurone biologique/Neurone formel	135
B.2 Neurone formel	136
B.3 Fonctions d'activations : (a) seuil, (b) linéaire et (c) sigmoïde	136
B.4 Réseau de neurones non bouclé (Perceptron multicouches)	138
B.5 Réseau de neurones bouclé	139
B.6 Étapes d'apprentissage par l'algorithme de rétro-propagation	141
B.7 Algorithme de rétro-propagation	142

Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre les réseaux WSN, VANET et FANET	13
2.1	Comparaison des méthodes d'estimation des distances/angles	27
2.2	Comparaison des méthodes de calcul de la position	31
2.3	Types et grandeurs des erreurs du GPS	35
2.4	Comparaison des systèmes de localisation	38
2.5	Comparaison des caractéristiques des systèmes de positionnement par satellites	40
3.1	Comparaison des techniques de localisation relative dans les WSNs	45
3.2	Comparaison des techniques de localisation relative dans les VANETs . . .	47
3.3	Comparaison des techniques de localisation relative dans les FANETs . . .	49
3.4	Paramètres de simulation	55
4.1	Comparaison entre différentes trajectoires de l'ancre mobile	70
4.2	Paramètres de simulation	83
5.1	Comparaison entre précision de la localisation des applications VANET . .	94
5.2	Comparaison des techniques de correction des positions des nœuds dans les réseaux VANET	99
5.3	Paramètres d'implémentation de notre réseau de neurones	106
5.4	Paramètres de simulation	106

AoA Angle of Arrival. 22, 26, 37

DGPS Differential Global Positioning System. 33

EKF Extended Kalman Filter. 96

FANET Flying Ad-hoc NETwork. 3, 10, 11, 12, 16, 17

GCS Ground Control Station. 8

GNSS Global Navigation Satellite System. 39

GPS Global Positioning System. 3, 14, 15, 28, 32, 33, 34, 35, 36, 95, 96, 97

INS Inertial Navigation System. 3, 35, 95, 96, 97

IVCAL Inter-vehicle-Communication-Assisted Localization. 100

KF Kalman Filter. 96

MANET Mobile Ad-hoc NETwork. 2, 3, 6, 7, 10, 11, 93, 113

OHPE Optimization of Hilbert Path Energy. 62

OHPL Optimization of Hilbert Path Length. 62

- RHC** Radio Hop Count. 22, 26
- RSSI** Received Signal Strength Indicator. 16, 22, 23, 24, 37, 65, 69
- RWP** Random way point. 65, 66, 69
- SMC** Sequentiel Monte Carlo. 96
- TDoA** Time Difference of Arrival. 22, 48
- ToA** Time of Arrival. 22, 24, 25, 32, 37, 65
- UAANET** UAV ad-hoc NETwork. 10
- UAV** Unmanned Aerial Vehicle. 8, 12, 13
- UKF** Unscented Kalman Filter. 96
- US** Unit Square. 71
- UWB** Ultra Wide Band. 47, 48, 49
- V2I** Vehicle-to-Infrastructure. 6, 7
- V2V** Vehicle-to-Vehicle. 6, 7
- VANET** Vehicular Ad-hoc NETwork. 3, 6, 7, 11, 12, 13, 15, 18, 93, 94, 95, 96
- Wi-Fi** Wireless Fidelity. 47
- WSN** Wireless Sensor Nestwork. 2, 7

CHAPITRE 1

Introduction générale

Sommaire

1.1	Présentation du contexte	2
1.1.1	Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)	4
1.1.2	Les réseaux de véhicules (VANET)	6
1.1.3	Les réseaux de drones	8
1.2	Problématique	14
1.3	Objectifs et contributions	16
1.4	Organisation de la thèse	17

1.1 Présentation du contexte

De nos jours, les technologies sans fil font partie de toutes nos activités quotidiennes. Que ce soit dans de simples ordinateurs portables, des téléphones mobiles, etc. Cependant, la partie principale de ces technologies sans fil, est basée sur des infrastructures fixes, limitant la mobilité des utilisateurs. Pour faciliter cette mobilité, un autre type de réseau est apparu qui permet aux nœuds du réseau de communiquer directement entre eux sans aucune infrastructure : ce sont les réseaux mobiles Ad hoc.

Un réseau mobile Ad hoc (Mobile Ad-hoc NETWORK (MANET)) peut être défini comme un ensemble de nœuds mobiles interconnectés entre eux par une technologie sans fil formant un réseau temporaire sans l'aide de toute administration centralisée ou de tout support fixe. Dans un réseau Ad hoc, la portée de l'ensemble formé par les différents nœuds est déterminée par la portée de chaque nœud. Cela signifie que si deux nœuds du réseau sont hors de portée l'un de l'autre, ils ne pourront pas communiquer directement. Pour cela, ils doivent utiliser d'autres nœuds comme relais.

La nature décentralisée des réseaux MANET les rend adaptés à une multitude d'applications où le déploiement d'une infrastructure est trop contraignant. Les applications des réseaux MANET peuvent être classées selon leurs environnements d'utilisation, objectifs, types de nœuds ou de communications :

- Les MANET peuvent être utilisés dans les environnements militaires afin de surveiller le déplacement de l'ennemi dans un espace géographique donné, ou de récolter des données dans une zone dangereuse où l'envoi d'êtres humains serait risqué.
- Les opérations de recherche, de secourisme et de sauvetage durant les catastrophes naturelles comme dans le tremblement de terre, les feux, l'inondation, etc.
- Les MANET peuvent être utilisés aussi pour un usage personnel comme le partage des applications et des équipements mobiles tels que les smartphones, les laptops, les imprimantes, etc.
- Les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Network (WSN)) sont considérés comme un type particulier de réseaux MANET et qui peuvent être exploités pour les applications environnementales. Les nœuds de ce type de réseaux consistent en un grand nombre de capteurs capables de capter, de récolter et de transmettre des données environnementales (la température, l'humidité, la pression, etc.) d'une manière autonome.

- Un réseau de véhicules (Vehicular Ad-hoc NETWORK (VANET)) est aussi une particularité d'un réseau MANET où les nœuds sont des véhicules intelligents qui peuvent communiquer entre eux dont l'objectif est d'améliorer la sécurité sur les routes ou le confort des passagers.
- Les réseaux ad hoc de drones (Flying Ad-hoc NETWORK (FANET)) définit une nouvelle application de MANET où les nœuds mobiles sont des drones. Les drones peuvent être contrôlés à distance par un pilote ou voler de façon autonome en se basant sur des plans de vol préprogrammés. Les drones peuvent être utilisés pour la collecte de données et la détection de situations, sans risquer que le pilote soit dans un environnement étranger et hostile. Avec la technologie de réseaux embarquée, plusieurs drones peuvent communiquer entre eux et travailler en collaboration afin d'accomplir une mission avec des meilleures performances.

La plupart de toutes ces applications dépendent de la localisation des nœuds, donc il ne suffit pas seulement de détecter l'événement ou collecter l'information mais également connaître l'endroit précis de son déroulement. En outre, pour n'importe quelle application, localiser l'origine de l'information reçue par un nœud joue un rôle vital dans la compréhension du contexte d'une telle application.

Au vu de l'importance de la localisation des nœuds dans les réseaux MANET, plusieurs techniques ont été proposées. Ces techniques de localisation peuvent être classifiées en trois groupes selon leurs environnements (indoor, outdoor) et selon le type des nœuds (équipés de GPS ou non) :

- Correction des positions des nœuds mobiles : Les techniques de cette classe consistent à équiper tous les nœuds d'un récepteur Global Positioning System (GPS) afin qu'ils reçoivent en temps réel leurs coordonnées. Cependant, le GPS souffre de nombreux problèmes liés à la mauvaise visibilité des satellites dans les zones urbaines où les conditions de trajets multiples sont sévères, et qui peuvent dégrader considérablement les précisions des positions GPS. Pour cela, plusieurs techniques ont été proposées afin de corriger les positions GPS et d'améliorer la précision des positions. La plupart de ces techniques sont basées sur la fusion de plusieurs sources d'informations tels que les systèmes GPS et Inertial Navigation System (INS).
- Localisation à l'aide d'un nœud mobile : Les solutions de la première classe résolvent le problème de la localisation dans les réseaux avec des nœuds qui n'ont pas de contrainte d'énergie et de taille comme le cas des réseaux VANET. Par contre, pour

les réseaux avec contrainte comme les réseaux de capteurs sans fil où les nœuds sont de petites tailles et alimentés par des batteries, équiper chaque nœud du réseau avec un récepteur GPS peut être très coûteux et réduit la durée de vie des nœuds. Par conséquent, les chercheurs ont trouvé une alternative qui consiste à doter un nombre limité de nœuds avec le système GPS appelés nœuds de référence ou ancre pour aider les autres nœuds à trouver leurs positions.

- Localisation relative des nœuds mobiles : Les techniques proposées dans la première ou la deuxième classe (tous les nœuds ou certains nœuds sont équipés de GPS) résolvent le problème de la localisation dans les environnements extérieurs, son utilisation dans les environnements intérieurs (bâtiments, tunnel, mine, etc.) est limitée dû à la mauvaise pénétration des signaux GPS à cause des obstacles. Pour localiser les nœuds dans les environnements intérieurs, plusieurs techniques de localisation relative ont été proposées. Les techniques de cette classe ne sont basées ni sur un sous ensemble de nœuds connaissant leur position (ancres), ni sur des équipements spéciaux (GPS), mais, chaque nœud utilise seulement des informations relatives obtenues par l'échange des positions. Les techniques de localisation relative peuvent être utilisées dans les environnements intérieurs où aucune information GPS n'est disponible et aussi pour les applications qui nécessitent de connaître les positions de tous les nœuds les uns par rapport aux autres, comme le cas d'une flotte de drones en mission et utilisant l'autopilotage et en évitant les collisions entre eux.

Afin d'étudier la localisation dans les trois différents environnements présentés ci-dessus, nous avons choisis trois applications des réseaux MANET et qui s'adaptent avec ces environnements :

- Les réseaux de drones pour la localisation relative des nœuds mobiles ;
- Les réseaux de capteurs sans fil pour la localisation à l'aide d'un nœud mobile ;
- Les réseaux de véhicules pour la correction des positions des nœuds mobiles.

1.1.1 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)

Un réseau de capteurs est constitué de milliers des nœuds capteurs, permettant de capter, collecter et de transmettre les informations captées dans différents environnements. Ces nœuds peuvent avoir des positions fixes ou bien être déployés aléatoirement pour surveiller l'environnement. Les communications dans un réseau de capteurs se font souvent d'une

manière multi-saut. L'acheminement des données se termine vers des nœuds spéciaux appelés nœuds puits ou stations de base (Sink) qui permettent l'interconnexion avec d'autres réseaux (Internet, satellite . . .) et de collecter et stocker les informations [1, 2, 3]. La Figure 1.1 illustre l'architecture d'un réseau de capteurs.

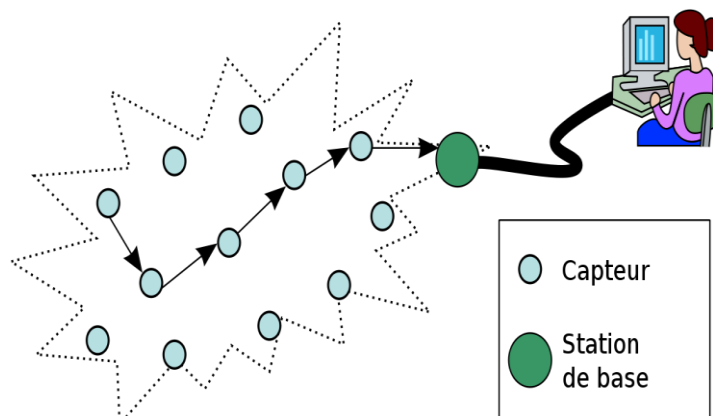


FIGURE 1.1 – Architecture d'un réseau de capteurs

Les réseaux de capteurs se caractérisent par plusieurs propriétés qui doivent être prises en considération lors du développement de nouveaux protocoles [3, 4, 5] :

- **Sans infrastructure** : Les RCSF appartiennent à la famille des réseaux sans fil sans infrastructure. Les capteurs sont généralement déployés aléatoirement dans des zones hostiles ce qui nécessite qu'ils doivent être capables à s'auto-configurer et s'auto-organiser sans intervention humaine.
- **Densité** : Dans les RCSF, les capteurs sont déployés généralement en grand nombre pour garantir la couverture totale de la zone d'intérêt et faire face aux pannes puisque les capteurs peuvent cesser de fonctionner pour différentes causes. Nous pouvons avoir dans certains cas des RCSF de haute densité dont la taille dépasse des milliers de capteurs.
- **Interférence** : La notion d'interférence apparaît dans la plupart des réseaux sans fil en particulier dans les RCSF où deux capteurs voisins peuvent transmettre dans la même bande de fréquences, ce qui peut causer des interférences.
- **Topologie dynamique** : Les capteurs sans fil peuvent être placés sur des objets mobiles par exemple sur des animaux pour les surveiller à distance sans perturber leur comportement. Ce type de scénario génère une topologie dite dynamique.

- **Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul :** La caractéristique la plus critique dans les RCSF est la limite des ressources énergétiques car la plupart des capteurs sont dotés de piles à énergie limitée. À cet effet, dans la plupart des travaux de recherche, n'importe quelle problématique est traitée conjointement avec l'économie de l'énergie.

La possibilité de s'auto-organiser et d'établir des communications entre les capteurs sans aucune intervention humaine, notamment dans des zones inaccessibles ou hostiles permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs et divers domaines d'applications [5, 6, 7], tels que le domaine militaire, scientifique, industriel, médical, climatique, etc.

1.1.2 Les réseaux de véhicules (VANET)

Les réseaux VANET constituent un nouveau type de réseaux issu des réseaux ad hoc. Leur particularité provient des communications qui peuvent s'instaurer entre véhicules via une communication (Vehicle-to-Vehicle (V2V)) ou bien avec des stations de base (Road Side Unit) installées au bord de la route via une communication (Vehicle-to-Infrastructure (V2I)) (voir la Figure 1.2). Par rapport à un réseau ad hoc classique, le VANET se caractérise par une forte mobilité des nœuds rendant la topologie du réseau fortement dynamique [8, 9, 10].

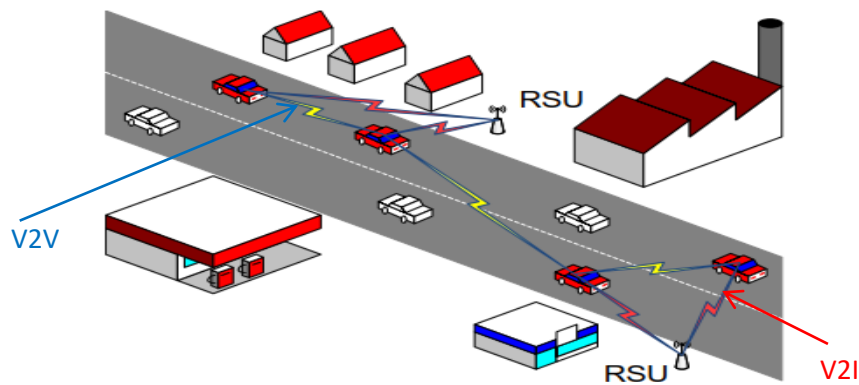


FIGURE 1.2 – Types de communication dans un réseau VANET

Un réseau VANET n'est autre qu'une application dédiée et spécifique des réseaux MANET. Cependant, les travaux de recherche étudiés et réalisés dans le domaine des MANET ne peuvent pas être directement appliqués dans le contexte des réseaux VANET

à cause de leurs spécificités [11]. Les spécificités et les caractéristiques des réseaux VANET peuvent être résumées comme suit [8, 12] :

- **Forte mobilité** : À la différence des réseaux Ad hoc, les réseaux VANET sont caractérisés par une forte mobilité, liée à la vitesse des véhicules, en particulier sur autoroute. Un nœud peut rejoindre le réseau et le quitter en un temps très court, ce qui rend les changements de topologie très fréquents.
- **Capacité de stockage et de traitement** : En plus des interfaces radio sans fil, les véhicules sont dotés de grandes capacités de stockage, de puissance de traitement ainsi que de sources d'énergie illimitées. Ce qui présente un des avantages des réseaux véhiculaires par rapport aux autres réseaux tels que MANET et WSN, qui sont limités en termes de ressources.
- **Mobilité prédictible** : Les environnements dans les réseaux ad hoc sont souvent limités à des espaces ouverts. Les déplacements des véhicules, quant à eux, sont liés aux infrastructures routières (routes, autoroutes). Les trajectoires peuvent donc être prédictibles et l'environnement peut être urbain, rural ou autoroutier. Les contraintes imposées par ce type d'environnement, à savoir les obstacles et les interférences radio, affectent le modèle de mobilité et la qualité des transmissions radio. Les protocoles et les solutions doivent donc prendre en compte ces spécificités.
- **Type de transmission** : La majorité des applications des MANETs utilisent les transmissions unicast, c'est à dire des communications entre deux nœuds dans le même réseau ou vers d'autres types de réseaux. Mais, dans les VANET l'une des applications clé est la prévention et la sécurité routière. Ce type d'application s'appuie sur la diffusion de messages d'une source vers un ensemble de véhicules généralement proches et limitée à une zone géographique.
- **Densité** : La variation de la densité des véhicules est spatio-temporelle. Par exemple, la densité en milieu urbain est beaucoup plus élevée qu'en milieu rural. D'un point de vue temporel, la densité est par exemple différente selon qu'on considère la nuit ou la journée, les heures de pointe ou les heures creuses.

Le type de communication de véhicules (V2V et V2I) et les ressources embarquées ont permis d'envisager plusieurs applications pour les réseaux véhiculaires. Ces applications peuvent être classifiées selon le service offert en trois grandes catégories [8, 12] :

- **Application de sécurité routière :** Ces applications permettent de prévenir les collisions et les travaux sur les routes, de détecter les obstacles et de distribuer les informations météorologiques par envoi de messages d’alerte. À titre d’exemple, alerter un conducteur en cas d’accident permet d’avertir les véhicules qui se dirigent vers le lieu de l’accident que les conditions de circulation se trouvent modifiées et qu’il est nécessaire de redoubler de vigilance.
- **Applications de gestion de trafic :** Les applications de cette classe sont basées sur l’amélioration des conditions de circulation dans le but de réduire les embouteillages et les risques d’accidents. Elles consistent à fournir aux conducteurs des informations leur permettant d’adapter leur parcours à la situation du trafic routier. Ces applications visent à réduire les pertes humaines, la durée des voyages et la consommation d’énergie. . .
- **Applications de confort :** Les applications de confort ont pour objectif de rendre les voyages plus agréables en permettant aux passagers de communiquer soit avec d’autres véhicules ou avec des stations fixes comme l’accès à Internet, la messagerie, le chat inter-véhicules, etc.

1.1.3 Les réseaux de drones

A. Les drones :

Un drone ou Unmanned Aerial Vehicle (UAV) désigne un aéronef sans pilote à bord, pouvant être télécommandé à distance depuis une station sol. Une station sol est un ensemble d’entités physiques et de logiciel (Ground Control Station (GCS)) qui permet de contrôler le mouvement des drones. Selon le type de station utilisée, elle peut être munie d’une interface homme-machine qui permet à l’opérateur au sol de surveiller en temps réel la position d’un drone [13].

Les drones sont utilisés généralement pour des missions de reconnaissance ou de surveillance, ils recueillent des informations multiformes sur des objectifs au sol et transmettent leurs images ou autres données par liaisons sans fil [14]. Afin d’améliorer les performances des drones sur ces missions, des recherches sont menées afin de rendre les drones coopératifs. Une flotte de drones coopératifs serait alors capable de réaliser plus rapidement des missions plus complexes [13, 15] par le partage de différentes tâches entre eux. Afin d’établir la communication au sein d’une flotte de

drones, différentes architecture de communication peuvent être distinguées (voir la Figure 1.3) [15, 16, 17] :

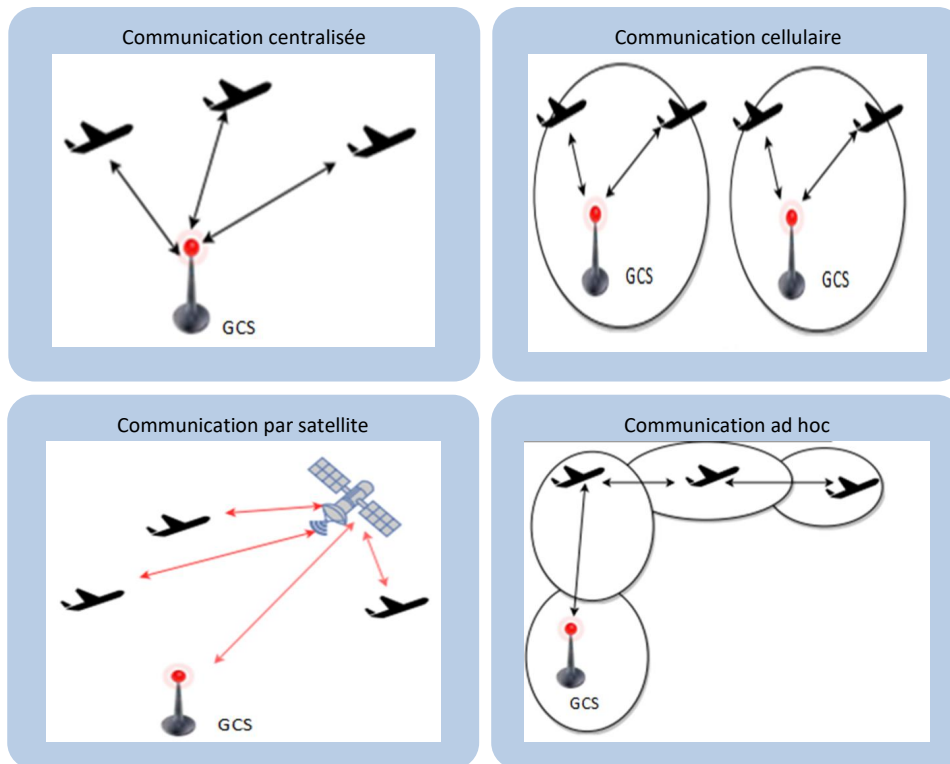


FIGURE 1.3 – Architectures de communication pour une flotte de drones

- **Architecture de communication centralisée** : Dans cette architecture, chaque drone est directement connecté à la station sol pour transmettre les données et pour recevoir le flux de commande et de contrôle. Les drones ne peuvent pas directement se connecter entre eux, ce qui nécessite de passer par la station sol.
- **Architecture de communication cellulaire (semi-centralisé)** : Cette architecture se base sur l'utilisation d'une infrastructure de stations de base et des cellules. Dans chaque cellule, on peut trouver un sous-ensemble de drones et une station sol qui gère le groupe. La communication inter-groupes doit passer par la station sol, par contre, la communication directe intra-groupe peut être établie.
- **Architecture de communication par satellite** : Dans cette architecture, le satellite fonctionne comme un relais de communication. Ses antennes de

réception reçoivent les signaux émis depuis la station sol ; ces signaux sont par la suite transposés en fréquence et amplifiés avant d'être retransmis vers les drones. L'utilisation des satellites permet d'assurer une couverture plus efficace que celle d'une communication centralisée. Cette architecture nécessite toujours un routage par satellite et en cas de présence d'obstacles autour de la station sol (un immeuble, par exemple), la communication vers le satellite peut être partiellement atténuée ou complètement bloquée.

- **Architecture de communication ad hoc** : C'est une architecture complètement décentralisée où les drones sont capables de s'auto-organiser sans la nécessité d'une infrastructure fixe. Si un émetteur n'est pas à portée directe de la destination, les informations sont transmises de proche en proche, le long du chemin établi.

Pour une flotte de drones, l'architecture ad hoc a plusieurs avantages [15] par rapport aux autres types d'architectures :

- Présence d'obstacles : En cas de présence d'obstacles et grâce à l'architecture ad hoc, il est possible de former une chaîne de drones, qui pourrait contourner l'obstacle.
- Fiabilité des communications : L'auto-organisation d'un réseau ad hoc sans fil permet aux drones de chercher un autre chemin en cas de perte d'un lien.
- Absence d'infrastructure : Les nœuds du réseau sont responsables de l'établissement et du maintien de la connectivité du réseau.
- Mobilité et flexibilité : Grâce à la topologie dynamique, les drones se déplacent librement et arbitrairement en fonction des objectifs de la mission.

B. Réseau ad hoc de drones :

Le réseau ad hoc de drones, connu aussi sous la dénomination anglaise UAV ad-hoc NETWORK (UAANET) ou encore Flying Ad hoc NETWORK (FANET), définit une nouvelle forme de MANET où les nœuds sont des drones qui collaborent entre eux ou avec la(les) station(s) sol pour échanger des données afin d'accomplir une mission avec de meilleures performances [13].

Il existe différents types de messages échangés entre les drones et la station sol [15] qui peuvent être des données propres au routage (des paquets de contrôle et de commande) ou des informations propres au système aérien sans pilote :

- **Message de localisation du drone** : Ce message est envoyé périodiquement par les drones vers la station sol, pour l'informer de sa position en temps réel.
- **Message de signalement** : Est un message envoyé périodiquement depuis la station sol pour communiquer avec les drones. Il permet de tester l'état de la liaison entre la station sol et le drone.
- **Message de contrôle, de commande et de configuration** : Ces messages sont envoyés vers l'autopilote embarqué à bord ou vers la charge utile. Ce type de message est considéré comme critique puisqu'il doit être échangé et traité en temps réel.

Les réseaux FANET sont une classe des MANET, qui hérite de ses caractéristiques de conception et possède des caractéristiques spécifiques [17, 18, 19, 20, 21, 22] qui le différencient des autres types de réseau :

- **Mobilité des nœuds** : Dans FANET, le degré de mobilité des nœuds est beaucoup plus élevé que dans les VANET et MANET. Un drone a une vitesse de 30 à 460 km/h, ce qui pose plusieurs problèmes de communication entre les nœuds.
- **Modèle de mobilité** : Les drones ont la liberté de bouger librement selon leurs plans de vol et parfois selon l'évolution de leurs tâches. Il est, donc, difficile de prédire les mouvements d'un drone puisque même avec un plan de vol prédéterminé, il y a toujours des changements imprévus à cause des conditions de l'environnement ou de l'évolution de la mission.
- **Densité** : La densité des nœuds dans FANET est généralement faible en raison des grandes distances séparant les nœuds et qui peuvent atteindre des kilomètres, ce qui conduit à utiliser des portées de transmission plus larges.
- **Connectivité réseau** : La connectivité au sein du réseau FANET est souvent intermittente en raison de la forte mobilité et la faible densité des drones, qui crée des déconnexions temporaires.
- **Environnement** : Dans un réseau FANET, les drones circulent dans l'air. Par conséquent, le modèle de perte en espace libre est souvent utilisé pour modéliser la couche physique.
- **Consommation énergétique** : Dans FANET, il n'y a pas de contrainte d'énergie puisque chaque nœud est équipé de batteries rechargeables, qui sont

rechargées en permanence lorsque les UAV se déplacent. De plus, les batteries peuvent être alimentées par ressources tels que l'énergie solaire, l'essence, l'énergie électrique, etc. Par conséquent, nous pouvons dire que les nœuds FANET ne sont soumis à aucune restriction d'énergie, contrairement aux nœuds MANET, où il faut prendre en considération la consommation d'énergie des protocoles de communication pour prolonger la durée de vie du réseau. Toutefois, dans le cas des mini-drones, la contrainte de consommation d'énergie constitue l'un des principaux inconvénients dû aux limitations de taille et de poids.

Une autre exigence des FANET est le passage à l'échelle [13]. En effet, pour certaines missions, l'amélioration des performances du système est liée au nombre de drones impliqués. Par exemple, les auteurs dans [23] montrent que plus le nombre de drones impliqués dans des missions de recherche et de sauvetage est grand, plus la mission est rapide.

Ces caractéristiques, rendent les FANET faciles à déployer dans différents environnements. Par exemple, les nœuds drones peuvent également communiquer avec différentes infrastructures localisées au sol, telles que des stations sol ou des nœuds capteurs. Pour cela, les réseaux FANET peuvent être déployés en trois environnements différents [15, 17, 24, 25, 26] tels que, coopération multi-drones, coopération drones et station sol et coopération drones et VANET :

- **Coopération multi-drones** : Plus le nombre de drones dans une mission est grand, plus les résultats obtenus seront précis et la durée de la mission sera réduite. Pour cela, certaines missions nécessitent une coopération entre plusieurs drones où le délai et la précision sont importants. Ce mécanisme décentralisé offre plus de robustesse puisqu'il n'est lié à aucune infrastructure fixe. De nombreuses applications sont basées sur la coopération multi-drones, telle que la détection de cible, la localisation géographique précise, le suivi et la surveillance en cas de catastrophe et les situations d'urgence. Par exemple, dans le projet Airshield [27] un réseau ad hoc de drones est déployé pour la supervision d'une zone géographique suite à un désastre où le cas de la supervision d'un incendie de forêt a été spécifiquement étudié.
- **Coopération drones et station sol** : Ils existent des informations importantes qui doivent être communiquées entre les drones et l'opérateur humain

situé sur le sol afin de prendre les bonnes décisions dans différents scénarios tels que les missions de recherche et de sauvetage, la surveillance militaire et d'autres applications civiles. Dans le contexte des opérations de recherche et de sauvetage, les UAV recherchent et détectent une cible, généralement au sol. Par exemple, dans [28], un système de collaboration multi-drones et station sol pour les scénarios de recherche et de sauvetage est proposé. Le système est utilisé pour évaluer les zones inaccessibles, en détectant les signaux sans fil des téléphones portables des victimes afin de localiser les éventuels survivants.

- **Coopération drones et VANET** : Récemment, un nouveau type de communication sans fil est apparu entre les drones et les véhicules afin d'accomplir certaines tâches. La coopération drones et VANET peut être utilisée dans différentes applications telles que la surveillance du trafic routier, amélioration du routage, livraison de paquets de données, etc. La surveillance du trafic routier est également une application potentielle dans laquelle les UAV peuvent remplacer une infrastructure d'observation. Les UAV peuvent détecter et signaler facilement les accidents de la route. Ils peuvent aussi capturer en temps réel des images de différentes situations et scénarios de sécurité routière. Par exemple, dans [29], un système de coopération drones et VANET est proposé dans lequel les UAV sont placés dans les carrefours dont le but est d'améliorer la sécurité routière.

Le tableau 1.1 présente une comparaison entre les réseaux WSN, VANET et FANET et résume les principales caractéristiques de chacun de ces réseaux.

TABLE 1.1 – Comparaison entre les réseaux WSN, VANET et FANET

Caractéristiques	WSN	VANET	FANET
Environnement	Espace ouvert	Infrastructures routières	En l'air
Densité	Forte	Spatio-temporelle	Moyenne
Mobilité des nœuds	Faible	Forte	Forte
Modèle de mobilité	Aléatoire	Prédictible	Prédéfini par le plan de vol
Source d'énergie	Limitée	N'est pas limitée	Limitée pour les mini-drones
Changement de topologie	Lent	Rapide	Rapide

1.2 Problématique

La localisation des nœuds (capteurs, véhicules ou drones) devient une tâche facile si chaque nœud dispose d'un récepteur de positionnement global (GPS). Cependant, le positionnement GPS est souvent entaché d'erreurs liées à la propagation dans l'atmosphère, à l'instabilité des horloges utilisées, aux obstacles dans le milieu de réception ou encore au bruit électronique du récepteur. En plus, le GPS est disponible seulement en extérieur, et encore si aucun obstacle ne vient obstruer le champ de vue des récepteurs.

Le fonctionnement de GPS sous un feuillage dense comme le cas d'un capteur dans une forêt, ou un véhicule dans des villes aux rues étroites, ou un drone dans un tunnel, n'est pas possible. Il est aussi coûteux, tant en ce qui concerne le matériel qui est dupliqué en nombreux exemplaires dans un réseau à forte densité. De plus, la réception du signal est très gourmande en énergie, ce qui n'est pas compatible avec les problématiques de gestion de durée de vie des batteries dans les réseaux de capteurs.

Le problème de la localisation des nœuds a une relation avec l'environnement et il est lié aux caractéristiques des réseaux mobiles tels que FANET, WSN et VANET :

- L'utilisation des nœuds drones a considérablement accru en raison des progrès remarquables de la technologie. Ils sont devenus le choix privilégié pour diverses applications telles que les missions de recherche et de sauvetage dans des environnements dangereux, les missions militaires, la photographie aérienne coopérative et la surveillance de l'agriculture, etc. Afin de déployer une flotte de drones pour de telles applications, certaines tâches doivent être réalisées, telles que la prévention des collisions entre les drones, le vol en formation et le vol en essaim. Ces tâches sont accomplies grâce à la connaissance de l'emplacement relatif de tous les nœuds dans le réseau. Cependant, la connaissance de l'emplacement précis de tous les nœuds d'une flotte de drone est l'une des exigences les plus importantes à utiliser dans n'importe quelle application. Dans les missions extérieures, les récepteurs du système de positionnement global (GPS) peuvent être utilisés pour obtenir des données de position globale qui sont ensuite partagées, mais cela ne fonctionne pas à l'intérieur [30].

Dans les missions intérieures, des techniques de localisation relative qui ne nécessitent aucune informations GPS ni des nœuds de référence (ancres) ont été proposées pour calculer les positions d'une manière coopérative et relative.

- La localisation dans les réseaux de capteurs ne consiste pas seulement à déterminer les coordonnées géographiques des différents capteurs, ou des événements survenus

dans la zone surveillée, mais aussi pour le développement de protocoles de routage de l'information récoltée, la couverture de la zone d'intérêt, et l'agrégation des données, etc. Donc, elle est la première tâche exécutée par les nœuds 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, ...), afin de pouvoir déterminer l'origine des événements détectés.

La localisation à l'aide d'une ancre mobile est une méthode alternative largement utilisée pour localiser les nœuds capteurs. Dans cette technique, une ancre mobile qui connaît à priori ses coordonnées et qui n'a pas de contrainte d'énergie, traverse une zone d'intérêt et diffuse des paquets de position. Un nœud recevant trois paquets ou plus peut estimer sa position en utilisant la technique de trilatération. La localisation à l'aide d'une ancre mobile présente de nombreux avantages en termes de coût réduit, de précision élevée et de faible consommation d'énergie. Les défis majeurs de ces approches consistent à trouver la trajectoire optimale des ancres mobiles et à déterminer le moment et la position adéquats pour diffuser leurs paquets de position dans la zone de déploiement.

- Dans les VANET, les véhicules communiquent entre eux et échangent des informations dont l'objectif est d'améliorer la sécurité sur les routes ou encore les services proposées aux conducteurs. Échanger des informations entre différents véhicules proches afin d'avertir le conducteur de la présence d'un accident ou d'un obstacle sur la chaussée quelques centaines de mètres plus loin. Quand un accident se produit sur une route, des messages d'alerte doivent être diffusés pour informer tous les autres véhicules. La connaissance de la position du véhicule qui a causé l'accident est souvent indispensable pour avertir tous les autres véhicules qui se dirigent vers ce lieu dont le but est d'améliorer la sécurité des usagers de la route. L'utilisation du GPS connaît un essor important pour localiser les véhicules, mais le GPS souffre de nombreux problèmes liés à la mauvaise visibilité des satellites, et à la propagation des signaux, qui peuvent dégrader considérablement la précision des positions GPS. Afin d'améliorer la précision des positions GPS, les techniques d'intégration GPS/INS peuvent être considérées comme une solution dans certains cas. Cependant, dans le cas des zones urbaines où les conditions de trajets multiples sont sévères, plusieurs techniques d'intégration ont été utilisées pour rendre le système de localisation plus précis tel que le filtre Kalman (KF), les réseaux de neurones, la logique floue, etc.

1.3 Objectifs et contributions

Le but de ce travail est d'étudier le problème de la localisation des nœuds et de proposer de nouvelles solutions pour différents environnements et réseaux où (i) aucun nœud n'est équipé d'un GPS, (ii) certains nœuds sont équipés de GPS et (iii) tous les nœuds sont équipés de GPS.

Dans ce contexte, nous avons pu apporter les contributions suivantes :

Relative localization in a Swarm of UAVs

Dans le contexte des réseaux FANET, où aucune information GPS n'est disponible, nous avons proposé une nouvelle technique qui vise à établir les positions relatives de tous les drones d'une flotte dans un environnement fermé (par exemple, dans un tunnel ou une mine). Cette technique se base essentiellement sur l'établissement des positions relatives des nœuds voisins en fonction des distances mesurées entre les drones et sur la multilatération. Les distances entre les nœuds sont calculées à l'aide de la puissance du signal reçu (Received Signal Strength Indicator (RSSI)). Afin d'évaluer notre technique, plusieurs simulations ont été faites et cela dans différents environnements.

Optimal mobile beacon trajectories for nodes localisation in wireless sensor networks

En se basant sur la technique de localisation à une ancre-Hilbert, nous avons présenté deux nouvelles approches de localisation dans les réseaux de capteurs à l'aide d'une ancre mobile [31] :

- Optimization of Hilbert Path Length (OHPL) :Vise à minimiser la longueur de la trajectoire des ancres mobiles, à déterminer la position des ancres virtuelles, à garantir que tous les nœuds puissent recevoir au moins quatre messages pour se localiser et à améliorer la précision des positions.
- Optimization of Hilbert Path Energy (OHPE) : Vise à définir une trajectoire optimale de l'ancre mobile, à minimiser le nombre de messages reçus et à réduire la consommation d'énergie des nœuds capteurs.

L'analyse analytique et les résultats de simulations montrent l'efficacité de nos propositions, où on a pu minimiser la longueur de la trajectoire qui minimise la durée de la

localisation des nœuds et nous sommes arrivé aussi à minimiser le nombre de messages reçus et par conséquent à économiser la consommation d'énergie.

Reducing Complexity of GPS/INS Integration Scheme Through Neural Networks

Dans le contexte des réseaux VANET où chaque nœud est équipé de GPS, nous avons proposé une nouvelle technique de correction des positions [32]. Elle est basée uniquement sur un réseau de neurones dont le but est d'offrir une meilleure performance tout en présentant une complexité plus faible. L'idée est d'utiliser un réseau de neurones, qui émule le comportement d'un estimateur donné pour le remplacer. Nous avons fait des simulations, qui valident la performance et la robustesse de notre contribution dans diverses conditions. Notre réseau de neurones remplace alors le correcteur original complexe avec les mêmes performances mais avec moins de calcul et de complexité.

1.4 Organisation de la thèse

Ce manuscrit de thèse est organisé en six chapitres principaux. Le premier est un chapitre introductif, où nous présentons le contexte de cette thèse, la problématique ainsi que les contributions.

Dans le deuxième chapitre, nous étudions le problème de la localisation dans les environnements mobiles, nous détaillons les composants d'un système de localisation et nous examinons plusieurs techniques et systèmes de localisation proposés dans la littérature et qui peuvent être utilisées pour évaluer et estimer la position d'un nœud mobile.

Le troisième chapitre sera consacré au problème de la localisation relative dans les réseaux VANET. Dans la première partie, nous présentons quelques techniques et solutions proposées pour résoudre le problème de localisation relative dans les différents types de réseaux mobiles et en particulier dans les réseaux VANET. Dans la deuxième partie, nous proposons une nouvelle technique de localisation relative qui consiste à estimer les positions des nœuds voisins en fonction des distances mesurées entre les drones. Afin d'évaluer et d'étudier les performances de notre contribution, plusieurs simulations ont été faites avec plusieurs paramètres de simulations et dans différents environnements.

Le quatrième chapitre traite le problème de la localisation dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous commençons par montrer l'importance de la localisation, ses contraintes, ses propriétés et nous passons ensuite à la présentation des méthodes utilisées. La suite

de ce chapitre aborde nos deux contributions pour le problème de la localisation dans les RCSF à base d'une ancre mobile. Nous définissons deux nouvelles trajectoires qui peuvent être utilisées pour localiser les nœuds capteurs, Puis, nous évaluons ses performances analytiquement et par simulations.

Le cinquième chapitre est dédié au problème de la localisation dans les réseaux VANET. Dans la première partie, nous examinons plusieurs techniques et solutions proposées qui peuvent être utilisées pour corriger la position d'un véhicule. Dans la deuxième partie, nous proposons un estimateur de position robuste et simple dans les environnements à trajets multiples sévères. Nous avons choisi un correcteur de position complexe et robuste proposé dans la littérature puis, nous utilisons un réseau de neurones pour superviser la dynamique de ce correcteur de position. Notre réseau de neurones remplace alors le correcteur original complexe avec les mêmes performances mais avec moins de calcul et de complexité.

Le dernier chapitre conclut cette thèse. Il résume les contributions, ainsi que certaines perspectives qui peuvent compléter nos travaux.

Localisation : Systèmes et techniques

Sommaire

2.1	Introduction	21
2.2	Techniques de localisation	21
2.2.1	Estimation de distance/angle	22
2.2.1.1	Indicateur de puissance du signal reçu (RSSI)	23
2.2.1.2	Temps de parcours (ToA)	24
2.2.1.3	Différence du temps d'arrivée (TDoA)	25
2.2.1.4	Angle d'arrivée (AoA)	26
2.2.1.5	Le nombre de sauts (RHC)	26
2.2.1.6	Synthèse	27
2.2.2	Calcul de la position	27
2.2.2.1	Trilatération et Multilatération	28
2.2.2.2	Triangulation	29
2.2.2.3	Position centrale (Centre de gravité)	29
2.2.2.4	MinMax	30
2.2.2.5	Synthèse	30
2.2.3	Algorithme de localisation	31

2.3	Systèmes de localisation	31
2.3.1	Système de positionnement par satellite (GPS)	32
2.3.1.1	Positionnement absolu (GPS)	33
2.3.1.2	Positionnement relatif (DGPS)	34
2.3.1.3	Les erreurs du GPS	34
2.3.2	Systèmes de navigation inertielle (INS)	35
2.3.3	Map matching	36
2.3.4	Localisation cellulaire	36
2.3.5	Traitement d'image/vidéo	37
2.3.6	Localisation relative	37
2.3.7	Fusion de données	38
2.3.8	Synthèse	38
2.4	Autres systèmes de positionnement par satellites	39
2.4.1	GLONASS	39
2.4.2	GALILEO	39
2.4.3	BEIDOU (Compass)	40
2.5	Conclusion	40

2.1 Introduction

La localisation des nœuds est l'un des services les plus importants. Elle consiste à déterminer la position physique d'un nœud fixe ou mobile. Plusieurs domaines ont besoin de la localisation : la robotique, les réseaux ad hoc, les réseaux mobiles, la téléphonie mobile, l'aviation et l'astronomie.

La localisation est un procédé permettant de positionner un objet sur un plan ou une carte géographique, cette opération est réalisée à l'aide d'un terminal capable d'être localiser en temps réel ou de façon différée. Les positions enregistrées peuvent être stockées au sein du terminal et être extraites postérieurement, ou être transmises en temps réel vers une plateforme de localisation. La transmission temps réel nécessite un terminal équipé d'un moyen de télécommunication qui permet de recevoir les positions à des intervalles réguliers.

Ce chapitre présente les techniques et les systèmes utilisés pour la localisation des nœuds. Nous commençons par la définition et la composition d'un système de localisation, et nous terminons par la présentation de quelques techniques et systèmes utilisés pour estimer la position d'un nœud.

2.2 Techniques de localisation

Un système de localisation peut être décomposé en trois parties distinctes [33, 34]. Chaque partie a son propre objectif et méthodes de résolution. Ces trois parties (sous-systèmes) sont :

- Estimation de distance/angle.
- Calcul de la position.
- Algorithme de localisation.

Les performances du système de localisation sont directement liées aux performances de chaque partie. La Figure 2.1 illustre la décomposition du système de localisation en sous-systèmes. Dans la suite, nous présentons chacune des trois composantes du système de localisation.

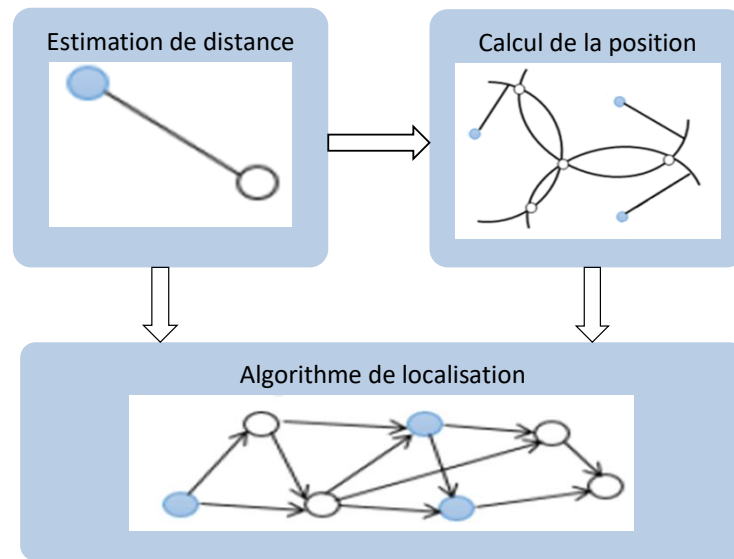


FIGURE 2.1 – Composition d'un système de localisation

2.2.1 Estimation de distance/angle

L'estimation de la distance/angle consiste à mesurer la distance/angle entre deux nœuds. Cette estimation est très importante car elle sera utilisée pour le calcul de la position par l'algorithme de localisation.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour estimer la distance/angle. Parmi ces méthodes on trouve : l'indicateur de puissance du signal reçu (RSSI), le temps de parcours (Time of Arrival (ToA)), la différence du temps d'arrivée (Time Difference of Arrival (TDoA)), l'angle d'arrivée (Angle of Arrival (AoA)) et le nombre de sauts radio (Radio Hop Count (RHC)) (voir la Figure 2.2).

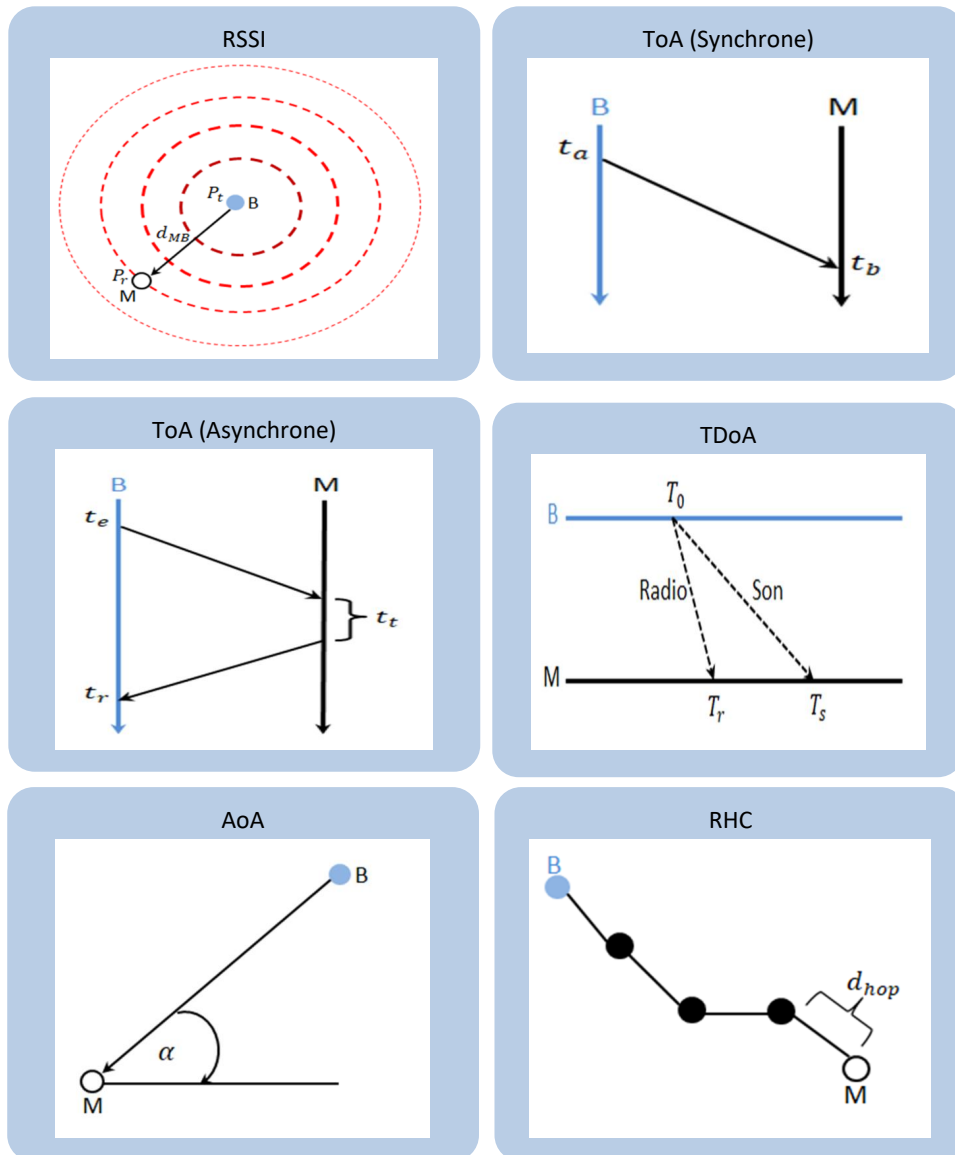


FIGURE 2.2 – Techniques d'estimation de distance/angle

2.2.1.1 Indicateur de puissance du signal reçu (RSSI)

RSSI [35], est une mesure de la puissance d'un signal reçu d'une antenne, il permet de fournir une indication sur l'intensité du signal reçu, son unité est le decibel (dB) [36].

La technique de localisation basée sur le RSSI utilise la puissance du signal reçu pour estimer la distance entre un nœud émetteur et un nœud récepteur. La distance est estimée en utilisant un modèle de propagation des ondes radio. Plusieurs modèles existent en général, chaque modèle est conçu pour un environnement et un scénario bien défini.

Dans le cas où le milieu traversé n'est pas caractérisé par les pertes de propagation (en espace libre), la puissance de signal reçu P_r est donnée par la formule de Friis [37] (2.1) :

$$P_r = P_t \times G_t \times G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.1)$$

Où :

- d : La distance entre l'émetteur et le récepteur.
- P_t, P_r : La puissance du signal transmis et reçu respectivement.
- G_t, G_r : Gain numérique de l'antenne du transmetteur et du récepteur respectivement.
- $\lambda = \frac{C}{f}$: Longueur d'onde ;
- C : Vitesse de la lumière (m/s) ;
- f : Fréquence du signal.

La méthode de RSSI est très utilisée pour les systèmes de localisation urbains, ruraux et en espace fermé. Le grand avantage de cette méthode est son faible coût car tous les nœuds sont déjà équipés de dispositif de communication sans fil. De plus, elle ne rajoute aucun surcoût de communication. Son inconvénient est sa sensibilité aux bruits, interférences, obstacles et types d'antenne. Par conséquent, les algorithmes de positionnement basés sur le RSSI sont sensibles à l'estimation des paramètres de l'environnement [36].

2.2.1.2 Temps de parcours (ToA)

La technique ToA exploite la relation entre la distance parcourue par un signal et le temps de parcours [38]. En effet, la distance entre l'émetteur et le récepteur est la multiplication du temps pris par le signal avec la vitesse des ondes radio :

$$Distance = Temps \times Vitesse \quad (2.2)$$

Les ondes radio se propagent en espace libre à la vitesse de la lumière $C = 3 \times 10^8 m/s$.

Si les nœuds sont synchrones, le récepteur peut alors calculer la distance le séparant de l'émetteur en multipliant la vitesse de propagation du signal (C) par la différence entre

les instants d'émission (t_a) et de réception du message (t_b) :

$$Distance = (t_b - t_a) \times C \quad (2.3)$$

Par contre, Lorsque les nœuds sont asynchrones, l'envoi d'un message aller-retour est nécessaire. En fonction du temps d'émission et de réception de ce message, de la vitesse de propagation du signal (C) et du temps de traitement du signal reçu, un récepteur obtient la distance qui le sépare de l'émetteur en calculant la différence entre les instants d'émission (t_e) et de réception (t_r), en y soustrayant le temps de traitement du signal (t_t), puis en divisant le résultat par deux :

$$Distance = \frac{(t_r - t_e) - t_t}{2} \times C \quad (2.4)$$

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

L'inconvénient majeur de cette technique est que la vitesse de propagation dépend des conditions extérieures comme la température et l'humidité [33].

2.2.1.3 Différence du temps d'arrivée (TDoA)

Contrairement à la technique ToA, la technique TDoA [39] n'a pas besoin de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur. Elle se base sur la différence des temps d'arrivée de plusieurs signaux et suppose également que la vitesse de propagation des signaux est connue.

Chaque nœud doit être équipé de deux dispositifs émission/réception, le premier dispositif utilise les ondes radio (*vitesse* $\cong 3 \times 10^8 m/s$) et le deuxième utilise les ondes sonores (*vitesse* $\cong 340 m/s$ à la température de l'air de $15^\circ C$) ou ultrasonores. Le nœud émetteur envoie deux signaux de nature différente simultanément (radio et son). Pour chaque signal reçu, le nœud récepteur note son temps d'arrivée. En général, le premier signal est utilisé pour déclencher le temps et dès l'arrivée du deuxième signal, le nœud aura directement la différence de temps d'arrivée. En connaissant les vitesses de propagation des deux signaux et l'écart de temps entre les deux réceptions, le nœud récepteur peut facilement calculer sa distance par rapport à l'émetteur par la formule suivante :

$$Distance = (T_s - T_r) \times V_s \quad (2.5)$$

Où :

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

L'inconvénient majeur de TDoA est que la distance à mesurer est limitée et qu'elle ne dépasse pas quelques mètres, car on suppose que le temps de propagation du signal radio est négligeable ($T_r = 0$) par rapport au temps de propagation du signal ultrasonore.

2.2.1.4 Angle d'arrivée (AoA)

Il est possible de localiser un nœud en utilisant des angles au lieu des distances. La méthode AoA [40] permet de mesurer l'angle d'arrivée d'un signal. Pour cela le nœud qui mesure l'angle doit être équipé soit par un ensemble de petites antennes ou plusieurs récepteurs à ultrason. Lorsqu'un nœud reçoit un signal, il utilise la phase ou le temps d'arrivée du signal au niveau de chaque antenne (ou récepteur ultrason) pour déduire l'angle d'arrivée du signal [33].

L'inconvénient de cette technique est qu'elle nécessite d'avoir du matériel supplémentaire ainsi que des distances minimales entre les différents récepteurs (à ultrason).

2.2.1.5 Le nombre de sauts (RHC)

Dans la méthode RHC [41, 42], si deux nœuds peuvent communiquer directement, alors la distance entre eux est inférieure à la portée maximale du dispositif de communication (R). Pour la localisation, seulement l'information de connectivité est utilisée.

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

La distance entre les nœuds M et B devient :

$$d_{MB} \approx d_{hop} \times h_{MB} \tag{2.6}$$

Où,

- d_{hop} : la longueur moyenne d'un saut.
- h_{MB} : Le nombre de sauts entre le nœud M et B .

L'inconvénient de cette méthode est la dépendance de précision par la portée de transmission (R) et du nombre de nœuds voisins [43].

2.2.1.6 Synthèse

Le choix d'une méthode d'estimation de distance/angle entre les nœuds est un facteur important qui influe sur les performances finales du système de localisation. Certaines méthodes sont précises, mais coûteuses (matériel supplémentaire, énergie, ressources processeur). D'autres sont imprécises mais elles ne nécessitent aucun matériel supplémentaire. Pour cela, la méthode choisie pour estimer les distances/angles dépend des besoins de l'application ainsi que des ressources disponibles. Le Tableau 2.1 illustre les caractéristiques essentielles des différentes méthodes d'estimation des distances/angles décrites dans cette section.

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

Méthode	Précision	Dist.maximale	Matériel.suppl	Défis
RSSI	2-4 m	La portée	Non	Bruits, Interférences
ToA	2-3 cm	La portée	Non	Synchronisation
TDoA	2-3 cm	Quelques mètres	Oui	Distance minimale
AoA	Quelques degrés (5°)	La portée	Oui	Distance minimale
RHC	$R/2$	Illimitée	Non	Faible précision

2.2.2 Calcul de la position

Quand un nœud a suffisamment d'information de distances/angles et de positions de ses voisins, il peut calculer sa position. Pour cela, plusieurs méthodes sont utilisées dans les systèmes de localisation. Parmi ces méthodes : la trilatération (Multilatération), la triangulation, la position centrale et la méthode de MinMax (voir la Figure 2.3).

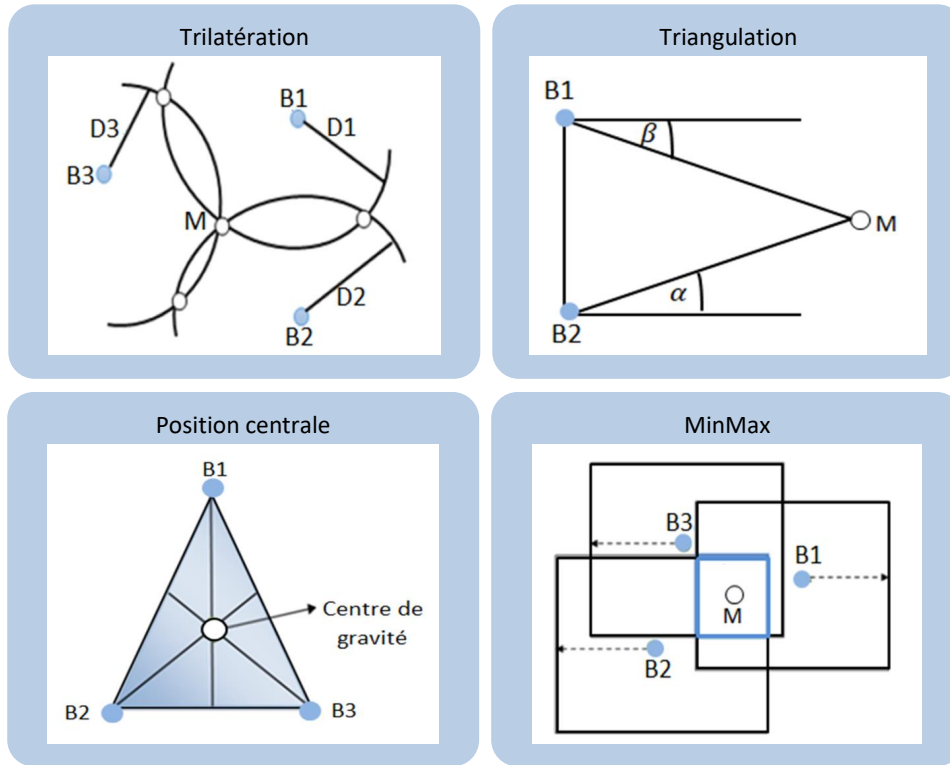


FIGURE 2.3 – Techniques de calcul de la position

2.2.2.1 Trilatération et Multilatération

La trilatération [44, 45] est la méthode la plus basique et intuitive. Cette méthode calcule la position d'un nœud par l'intersection de trois cercles, comme le montre la Figure 2.3(Trilatération). Pour estimer sa position (en 2D), un nœud a besoin de connaître la position de trois références ainsi que sa distance par rapport à ces derniers. La distance peut être estimée en utilisant l'une des méthodes décrites dans la première partie (Estimation de distance/angle).

Une référence est un nœud qui a ses coordonnées globales connues à priori. Ces coordonnées peuvent être préenregistrées ou obtenues à l'aide d'un dispositif externe comme le GPS. Les équations des cercles centrés aux positions des références ($B1(x_1, y_1)$, $B2(x_2, y_2)$, et $B3(x_3, y_3)$) et qui ont comme diamètres D_1 , D_2 et D_3 respectivement sont définies comme suit :

$$\begin{cases} (\hat{x} - x_1)^2 + (\hat{y} - y_1)^2 = D_1^2 \\ (\hat{x} - x_2)^2 + (\hat{y} - y_2)^2 = D_2^2 \\ (\hat{x} - x_3)^2 + (\hat{y} - y_3)^2 = D_3^2 \end{cases} \quad (2.7)$$

Où :

- (\hat{x}, \hat{y}) : La position du nœud à localiser.
- (x_i, y_i) : La position de la i ème référence.
- D_i : La distance entre le nœud à localiser et la i ème référence.

La position d'un nœud dans l'espace (3D) peut également être estimée en utilisant la technique de multilatération [46] où plus de trois distances (plus de trois points de références) sont disponibles pour la résolution d'un système d'équations.

2.2.2.2 Triangulation

La triangulation [40, 47] ressemble à la trilatération, mais elle utilise les angles à la place des distances. La position peut être calculée à distance où l'angle du signal émis par le nœud mobile est utilisé pour retrouver sa position. Considérons deux ancres $B1(x_1, y_1)$ et $B2(x_2, y_2)$ à portée du nœud mobile $M(x, y)$. Chacune dispose des moyens matériels pour mesurer l'angle sous lequel elle reçoit le signal de M (voir la Figure 2.3(Triangulation)). Soient α et β ces deux angles.

Le point M se retrouve à l'intersection des droites passant par les couples $(B1, M)$ et $(B2, M)$ (Voir la Figure 2.3). En définissant un nouveau repère dont l'origine est B1 et $(B1, B2)$ se superpose avec l'axe des coordonnées, on obtient la position du nœud M par la formule suivante :

$$M \left(\frac{y_2}{\tan \alpha + \tan \beta}; \frac{y_2 \times \tan \alpha}{\tan \alpha + \tan \beta} \right) \quad (2.8)$$

2.2.2.3 Position centrale (Centre de gravité)

Dans la technique de position centrale, la position la plus probable pour un nœud non encore localisé est le point central de toutes les références (Voir la Figure 2.3), le calcul de la position du nœud peut être fait sans estimer les distances entre le nœud et les références. Dans ce cas-là, la position du nœud est considérée comme le centre de gravité de triangle formé par les trois références $(B1(x_1, y_1), B2(x_2, y_2)$ et $B3(x_3, y_3))$ et elle est calculée en utilisant la formule suivante [48, 49] :

$$M \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) \quad (2.9)$$

Où n est le nombre de références. Cette méthode est la plus simple en termes de ressources de calcul et d'informations nécessaires. Cependant les solutions obtenues sont imprécises, notamment lorsque le nombre de références est réduit.

2.2.2.4 MinMax

Le principe de la technique MinMax (ou Bounding Box) consiste à déterminer, pour chaque nœud, un carré le contenant dont le centre de gravité correspond à sa position estimée. Sur la Figure 2.3(MinMax), le nœud M associe un carré à chacune des références $B1(x_1, y_1)$, $B2(x_2, y_2)$ et $B3(x_3, y_3)$ [33, 50]. Chaque carré est centré à la position de la référence et dépend de la distance estimée avec le nœud M . Par exemple, le carré centré en $B1$ est construit comme suit :

$$(x_1 - d_1, y_1 - d_1) \text{ et } (x_1 + d_1, y_1 + d_1)$$

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

$$(\max(x_i - d_i), \max(y_i - d_i)) \text{ et } (\min(x_i + d_i), \min(y_i + d_i)); i \in \{B1, B2, B3\}$$

Le nœud M estime sa position comme étant le centre gravité de ce carré et elle est calculée comme suit :

$$(x, y) = \left(\frac{\max(x_i - d_i) + \min(x_i + d_i)}{2}; \frac{\max(y_i - d_i) + \min(y_i + d_i)}{2} \right) \quad (2.10)$$

2.2.2.5 Synthèse

Plusieurs méthodes existent pour le calcul de la position d'un nœud. Le choix de la méthode de calcul de la position influe sur les précisions du système de localisation et dépend aussi des informations (distance ou angle) et matériels utilisés. Le Tableau 2.2 compare les différentes méthodes de calcul de la position présentées dans cette section.

TABLE 2.2 – Comparaison des méthodes de calcul de la position

Méthode	Nbre de références	Distance	Angle	Défis
Trilatération	3	Oui	Non	Sensible aux imprécisions des distances
Multilatération	≥ 3	Oui	Non	Complexité du calcul
Triangulation	2 ou 3	Non	Oui	Besoin de matériel supplémentaire
Position centrale	≥ 1	Non	Non	Faible précision
MinMax	≥ 2	Oui	Non	Faible précision

2.2.3 Algorithme de localisation

C'est la partie la plus importante du système de localisation. Elle définit la manière avec laquelle les informations disponibles (distances, angles, positions des nœuds déjà localisés) sont manipulées afin que la majorité ou la totalité des nœuds puissent estimer leurs positions. Les performances du système de localisation sont directement liées aux performances de chaque partie. Les algorithmes de localisation peuvent être classés en plusieurs catégories :

- **Distribué ou centralisé** : Les positions des nœuds sont calculées d'une manière distribuée par chaque nœud ou d'une manière centralisée par un seul nœud central.
- **Avec ou sans infrastructure** : La présence d'une infrastructure est indispensable ou non.
- **Positionnement absolu ou relatif** : Les positions calculées sont définies dans un repère global (exemple : latitude, longitude) ou relatif (par rapport à un nœud du réseau). On parle aussi de position physique et symbolique (dans tel ou tel bureau, à côté de tel objet).
- **Positionnement intérieur ou extérieur** : Si le système est mieux adapté aux applications intérieurs (indoor) ou plutôt extérieurs (outdoor).

2.3 Systèmes de localisation

Plusieurs systèmes de localisation ont été proposés pour calculer la position des nœuds mobiles (Voir la Figure 2.4). Dans cette section, nous expliquons brièvement chacun de ces systèmes et nous discutons quand et comment ils peuvent être utilisés pour localiser les nœuds [12, 30, 51] :

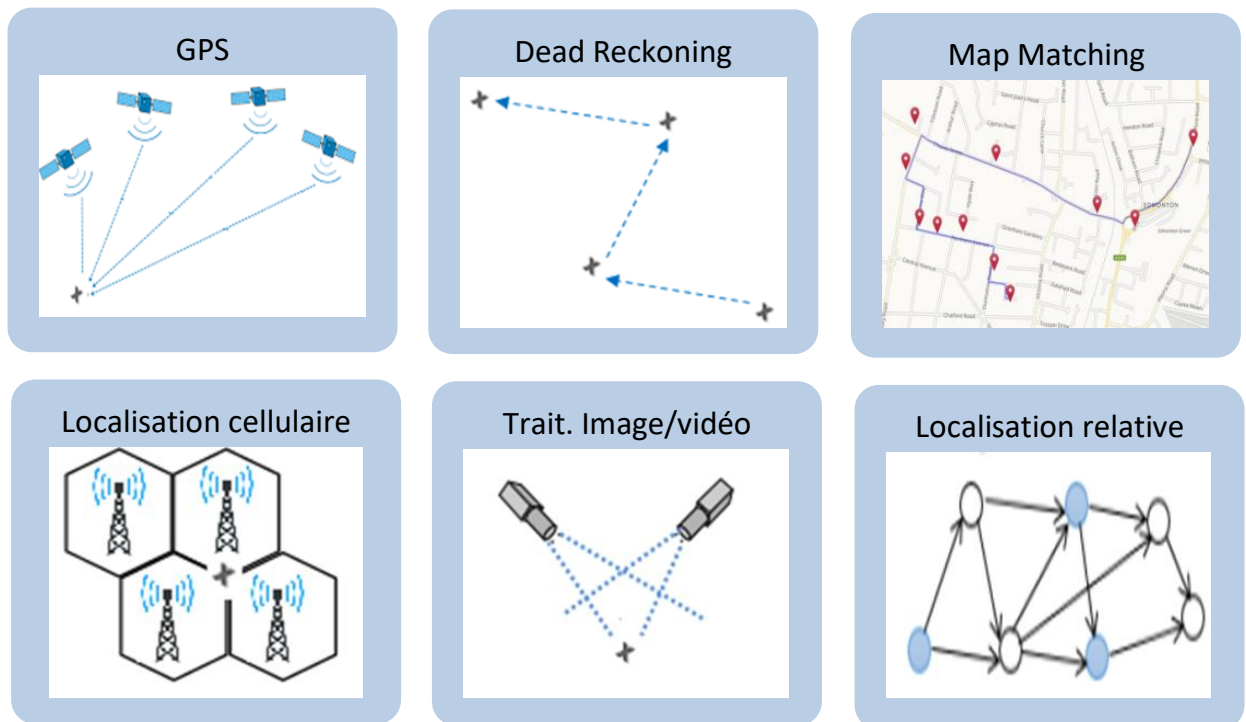


FIGURE 2.4 – Systèmes de localisation des nœuds mobiles

2.3.1 Système de positionnement par satellite (GPS)

Le GPS [51, 52], est le principal système de positionnement par satellite au monde. Il a été mis en place par le Département de la Défense des États-Unis et permet de connaître la position n'importe où au voisinage de la surface de la terre, en mer, dans l'air ou dans l'espace. Il est composé de 31 satellites qui fonctionnent en orbite autour de la terre. Chaque satellite se positionne à une hauteur de 20.200 km et fait deux rotations complètes chaque jour. Les orbites ont été définies d'une telle façon que chaque région de la terre peut voir au moins quatre satellites en même temps.

Un récepteur GPS est un équipement qui est capable de recevoir constamment des informations envoyées par les satellites et utilise ces informations pour évaluer sa distance à au moins quatre satellites connus utilisant la technique du temps de parcours (ToA) et, finalement, calculer sa position en utilisant la technique de trilatération [44]. Une fois que ces procédures ont été exécutées, le récepteur est capable de connaître sa latitude, longitude et l'altitude.

On distingue deux types de positionnement par satellites (voir la Figure 2.5) : posi-

tionnement absolu (GPS) et positionnement relatif (DGPS).

- Positionnement absolu (GPS) : Utilise une simple trilatération.
- Positionnement relatif (Differential Global Positioning System (DGPS)) : Utilise une station de base qui transmet aux récepteurs GPS les corrections des erreurs de trilatération.

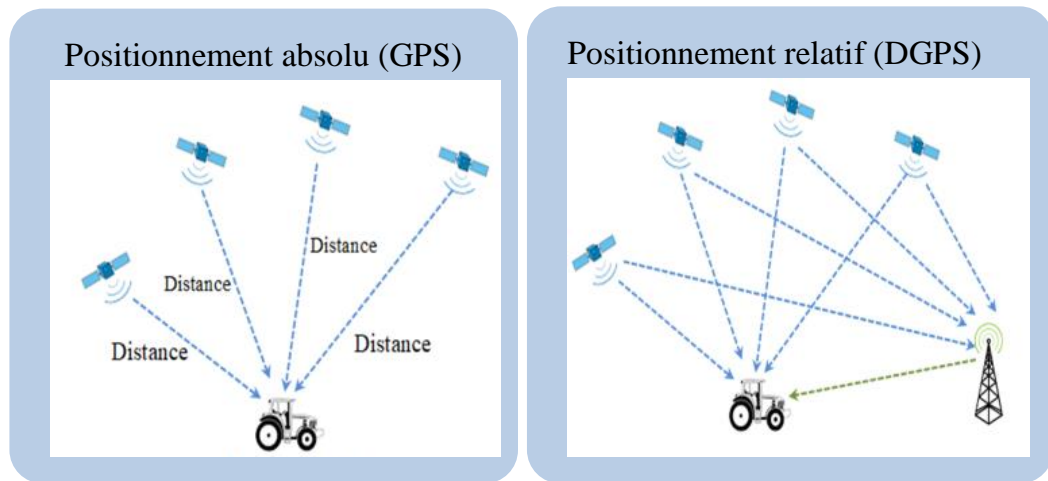


FIGURE 2.5 – Principe de positionnement absolu (GPS) et relatif (DGPS)

2.3.1.1 Positionnement absolu (GPS)

Dans le système de positionnement absolu par GPS, quatre satellites sont nécessaires au minimum pour la trilatération :

- Chaque satellite i émet un signal daté,
- Le récepteur calcule le temps parcouru par le signal (Δt_i),
- En déduit la distance entre le récepteur et le satellite i :

$$D_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} = C \times \Delta t_i, \text{ pour } i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.11)$$

Où,

(x_i, y_i, z_i) : Position du satellite i ;

(x, y, z) : Position du récepteur GPS ;

C : La vitesse de la lumière ($3 \times 10^8 m/s$) ;

Δt_i : Il est égal à la différence entre le temps d'arrivée t_a sur le récepteur et le temps de départ t_d du satellite i ($\Delta t_i = t_a - t_d$).

2.3.1.2 Positionnement relatif (DGPS)

Ce système fonctionne de la même manière que le GPS, mais il offre une meilleure performance :

- Il suffit d'y installer une station de référence dont la position est bien connue et qui calcule sa position à l'aide du GPS,
- En comparant la position calculée avec sa position connue,
- La station est en mesure de calculer la différence qui constitue l'erreur,
- Cette erreur retransmise vers les récepteurs qui l'intègrent dans le calcul de sa position.

L'inconvénient majeur d'un tel système est sa portée, qui n'excède pas une centaine de kilomètres ($\leq 300km$) autour des stations d'émission [53].

2.3.1.3 Les erreurs du GPS

La précision du calcul de la position GPS dépend de la prise en compte et du traitement des erreurs hardware, environnementales et atmosphériques [54] :

- Les erreurs atmosphériques sont des retards dus à la traversée de la couche de l'ionosphère et de la couche de la troposphère. En effet, en traversant l'ionosphère et la troposphère, les ondes radio qui voyagent théoriquement à la vitesse de la lumière (le récepteur prend cette vitesse lors des calculs) peuvent être ralenties ou réfractées, ce qui entraîne des retards lors du calcul ;
- L'erreur d'horloge du récepteur et des satellites due à une mauvaise synchronisation et à l'inexactitude de la mesure du temps de réception du signal par le récepteur. Par exemple, On prendra $300\,000km/s$ pour la vitesse de la lumière et le signal met $70ms$ à arriver :
 - si le récepteur ne fait aucune erreur, il calcule : $d = 0.07 \times 300\,000 = 21000km$
 - Si le récepteur calcule $71ms$ pour Δt , on obtient : $d = 0.071 \times 300\,000 = 21300km$On comprend mieux l'importance d'avoir une synchronisation parfaite des horloges.

- Les erreurs orbitales sont des inexactitudes de positionnement du satellite obtenues dans l'information du signal diffusé. En effet, la prévision de l'emplacement qu'occupera un satellite à un moment donné peut différer de sa position réelle.
- Erreur due aux éphémérides, En effet, lors du calcul de la position, le satellite est en mouvement, alors que le récepteur calcule sa position en fonction de la position fixe qu'il obtient des satellites. On a donc un très léger décalage entre la position calculée et la position réelle lorsque le récepteur est en mouvement.
- Le bruit du récepteur dépend de la qualité du matériel électronique utilisé dans le récepteur.
- Les multitrajets causés par les réflexions ou les diffractions sur les obstacles du milieu, particulièrement en milieu montagneux, qui augment la durée de trajet des ondes.

Le tableau 2.3 présente les différents types et grandeurs des erreurs sur la distance pour chaque satellite [54] :

TABLE 2.3 – Types et grandeurs des erreurs du GPS

Type d'erreur	Erreurs sur la distance
Erreurs dues à l'ionosphère	40 m
Erreurs dues à la troposphère	4 m
Erreurs d'horloges	36 m
Erreurs orbitales	2 m
Erreurs due aux éphémérides	8.4 m
Erreurs de bruit du récepteur	0.3 m
Erreurs dues aux multitrajets	8.3 m
Erreur maximale (dans la plupart des cas)	100 m

2.3.2 Systèmes de navigation inertielle (INS)

Contrairement au GPS, les systèmes de navigation inertielle (INS) sont entièrement autonomes et ne nécessitent aucun signal externe afin de calculer la position d'un nœud mobile. Ils sont basés uniquement sur des mesures d'accélération linéaires et de vitesses angulaires provenant de capteurs inertiels (accéléromètres et gyroscopes).

Les systèmes INS font partie de la grande famille des systèmes de navigation à l'estime (Dead Reckoning) [51, 55], où la position actuelle d'un nœud mobile peut être calculée en

se basant sur sa dernière position connue et en utilisant les informations de mouvement comme la direction, la vitesse, l'accélération, la distance, le temps, etc. La dernière position connue peut être obtenue, par exemple, en utilisant des récepteurs GPS (qui est le plus commun) ou en localisant une référence connue (carrefour, parking, etc.) sur une carte numérique.

Le Dead Reckoning peut être utilisé seulement pendant des périodes courtes dans le cas de l'absence de GPS. La raison d'éviter l'utilisation de cette technique au cours de longues périodes de temps est qu'elle peut accumuler facilement des erreurs.

Puisque le Dead Reckoning accumule rapidement des erreurs, on l'utilise seulement comme un système de secours et ceci pendant la non disponibilité des informations GPS (cas de tunnel) [56, 57].

2.3.3 Map matching

Les études actuelles dans les systèmes d'information géographiques ont permis la collecte et le stockage, aussi bien que l'accès à des données géographiques très précises même pour des dispositifs moins puissants. Cette technologie a été appliquée avec succès pour stocker les informations de carte de ville dans des systèmes de carte de localisation.

Dans la technique Map Matching [58, 59], plusieurs positions obtenues périodiquement peuvent être utilisées pour créer une trajectoire évaluée. Cette trajectoire est alors comparée aux données de la carte numérique pour trouver la géométrie du chemin la plus appropriée sur la carte qui correspond à la trajectoire. En utilisant cette technique, les informations de position peuvent être précisément représentées sur la carte [51].

2.3.4 Localisation cellulaire

La localisation cellulaire [51, 60] profite de la présence d'infrastructure cellulaire mobile dans la plupart des milieux urbains pour évaluer la position d'un objet. Les applications connues de cette technologie incluent la localisation des téléphones portables, le suivi des animaux domestiques et la localisation des véhicules.

Pour fonctionner correctement, les systèmes cellulaires mobiles exigent l'installation d'une infrastructure de communication composée d'un certain nombre de stations de base cellulaires. Chaque station de base est responsable de fournir la communication aux téléphones portables situés dans sa zone. Comme les téléphones portables se déplacent dans une ville, ils continuent à changer leur station de base quand la force du signal d'une

nouvelle station de base devient plus forte que celle du signal utilisé. Cette procédure est appelée handoff.

Bien que seulement une station de base soit utilisée dans la communication, d'habitude plusieurs stations de base peuvent écouter et communiquer avec un téléphone portable à tout moment. Cela permet à un certain nombre de techniques de localisation d'être utilisées pour évaluer la position du téléphone portable. En utilisant l'une des techniques d'estimation de distance (RSSI, ToA, AoA) on peut calculer la distance aux stations de base, et une fois que nous avons les distances du téléphone portable à au moins trois stations de base, il est donc possible de calculer la position du téléphone portable en utilisant la technique de trilatération [12, 51].

La localisation cellulaire est d'habitude moins précise que le GPS. Son exactitude dépend d'un certain nombre de facteurs comme le milieu urbain actuel, le nombre de stations de base détectant le signal, l'algorithme de positionnement utilisé, etc. Cependant, les informations de position rassemblées par cette technique peuvent toujours être utiles quand elles sont combinées avec le Dead Reackoning et/ou la technique Map Matching. L'avantage de cette technique est que les signaux de l'infrastructure cellulaire ont plus de disponibilité dans des milieux urbains que des signaux de satellite (utilisé par les récepteurs GPS) qui peuvent être utiles pour des environnements intérieurs comme des parkings et même des tunnels [61].

2.3.5 Traitement d'image/vidéo

Des sources d'information d'image et de vidéo et des techniques de traitement de données peuvent être aussi utilisées pour des buts de localisation, particulièrement dans des systèmes de guidage des robots mobiles ou des drones [62]. Dans certains cas, des caméras sont disponibles dans les systèmes de sécurité mis en œuvre dans des parkings et des tunnels. Généralement, ces techniques de traitement d'image/Vidéo sont utilisées pour alimenter des algorithmes de fusion de données [63] pour évaluer et prévoir l'emplacement d'un objet mobile. En fait, les informations d'image et de vidéo sont des sources réelles que l'on peut utiliser pour calculer les paramètres d'emplacement d'un nœud mobile.

2.3.6 Localisation relative

Dans la localisation relative, des cartes de position relatives et locales peuvent être construites par un nœud en évaluant les distances/angles entre ses voisins et en échangeant

cette information de distance par une communication multi-sauts. Avec cette carte de position dynamique, un nœud peut se localiser par rapport aux nœuds voisins et aussi de localiser les nœuds dans son voisinage. Ce type de localisation relative a été utilisé surtout dans les réseaux Ad hoc et les réseaux de Capteurs[64], mais récemment un certain nombre de solutions ont été proposées pour les réseaux VANET [30, 65] et les réseaux Ad hoc de drones [66].

2.3.7 Fusion de données

Les systèmes présentés dans cette section sont basés sur une mesure de localisation unique. Leurs précisions peuvent être améliorées si plusieurs mesures de localisation sont effectuées et fusionnées. La fusion de données est une technique utilisée pour améliorer l'estimation de la localisation en combinant plusieurs sources pour acquérir de meilleures performances, réduire les coûts et obtenir une plus grande précision [51]. Par exemple, elle a pour but de compenser le manque de performances du système GPS en ajoutant des capteurs supplémentaires au système de localisation comme le système de navigation inertielle (INS) ou le système Map matching. Une description détaillée des techniques de fusion de données sera décrite dans le chapitre 5.

2.3.8 Synthèse

Tous les systèmes de localisation étudiés dans cette section ont leurs avantages et inconvénients et varient entre eux en termes de couverture, disponibilité, précision et coût. Le tableau 2.4 résume brièvement ces systèmes et leurs caractéristiques [51].

TABLE 2.4 – Comparaison des systèmes de localisation

Système	Infrastructure	Disponibilité	Précision	Synchronisation	Coût
GPS	✓	✗	✗	✓	✓
DGPS	✓	✗	✓	✓	✓
Dead Reckoning	✗	✓	✗	✗	✗
Map Matching	✗	✓	✗	✗	✗
Localization Cellulaire	✓	✗	✗	✓	✓
Traitement d'Image/Video	✓	✗	✓	✗	✓
Localization relative	✗	✓	✓	✗	✗

2.4 Autres systèmes de positionnement par satellites

Les systèmes de positionnement par satellites (Global Navigation Satellite System (GNSS)) sont basés sur des constellations de satellites assurant une couverture mondiale ou régionale pour le géo-positionnement. Vu l'importance des GNSS, plusieurs systèmes (en plus du GPS) existent, ou sont en cours de développement, parmi lesquels on trouve le système russe GLONASS, le système européen GALILEO et le système régional chinois BEIDOU (COMPASS).

2.4.1 GLONASS

Le système GLONASS est l'équivalent russe du GPS. Ce système a été développé à partir de 1982 par les militaires Russes. Le 24 septembre 1995, les 24 satellites de la constellation sont placés en orbite et deviennent opérationnels à partir du janvier 1996. En octobre 2000, seuls six satellites sont en état de fonctionner. En 2010, il est redevenu opérationnel et une constellation de 24 satellites est répartie sur 3 orbites inclinées de 64.8° et situées à 19 100km. Cette répartition permet une réorganisation plus rapide des satellites en cas de panne. La particularité de ce système est que chaque satellite possède sa propre fréquence d'émission, ce qui augmente la résistance au brouillage. La période de révolution des satellites est égale à 11 heures 15 minutes. Les satellites de la constellation GLONASS peuvent être vus du sol et se retrouvent à la même place dans le ciel après huit jours. La partie au sol est composée de cinq stations de contrôle, la principale se trouve à Krasnoznamensk dans la région de Moscou [67].

2.4.2 GALILEO

GALILEO est le système de positionnement par satellites initié par l'Union Européenne et l'Agence Spatiale Européenne dont le déploiement doit s'achever vers 2020. La nécessité d'un système de positionnement européen répond au besoin d'indépendance face au système GPS américain. Ce système novateur et performant, actuellement en phase de déploiement, supprime les restrictions (précision et fiabilité) du GPS tout en restant entièrement sous contrôle civil. Il est donc à la fois concurrent et complémentaire du GPS. Le système GALILEO sera à terme constitué d'une constellation composée de 30 satellites, placés sur trois plans orbitaux distincts inclinés de 56° et situés à 23 222 km. Leur période de révolution est égale à 14 heures 07 minutes. La composante terrestre comprend 2 centres de contrôles coordonnant un minimum de 20 stations au sol [68].

2.4.3 BEIDOU (Compass)

Enfin, la Chine se dote de son propre système de positionnement par satellites Beidou (ou Compass). Ce système sera composé de 30 satellites en orbites (en 5 plans orbitaux) et 5 satellites géostationnaires pour améliorer les performances de localisation régionalement. Ce système est prévu pour être opérationnel en 2013 avec une couverture régionale et en 2020 avec une couverture globale. Il est actuellement opérationnel dans la région Asie-Pacifique dont le Laos, le Pakistan et la Thaïlande. Dans le domaine civil, il est utilisé notamment dans des domaines comme la navigation, les transports et les prévisions météorologiques. Il a également des applications dans le domaine militaire. Les satellites Beidou auront une révolution de 12 heures 53 minutes, une inclinaison de 55° et une altitude de 21 528km [69].

Le tableau 2.5 résume les principales caractéristiques des systèmes de positionnement par satellites GPS, GLONASS, GALILEO et Compass.

TABLE 2.5 – Comparaison des caractéristiques des systèmes de positionnement par satellites

Caractéristiques	GPS	GLONASS	GALILEO	Compass
Nation	USA	Russie	Europe	Chine
Altitude	20 200Km	19 100Km	23 222km	21 528km
Inclinaison	55°	64.8°	56°	55°
Période orbitale	11h 58	11h 15	14h 07	12h 53
Nombre de plan orbitaux	6	3	3	5
Nombre de satellites opérationnels	31	24	30	30 + 5
Accès multiple	CDMA	FDMA	CDMA	CDMA

2.5 Conclusion

La connaissance de la position des nœuds mobiles en temps réel est une supposition faite par la plupart des protocoles, des algorithmes et des applications. C'est une supposition très raisonnable, puisque des récepteurs GPS peuvent être installés facilement dans les nœuds. Mais, comme le GPS commence à montrer quelques problèmes peu désirés comme la non disponibilité dans certain cas ou le manque de précision pour quelques applications. Un certain nombre de techniques de localisation comme le Dead Reckoning, la localisation cellulaire, le traitement d'Image/Vidéo et la localisation relative ont été proposées afin de surmonter ces limitations.

CHAPITRE 2. LOCALISATION : SYSTÈMES ET TECHNIQUES

Toutes ces méthodes ont été présentées et détaillées dans ce chapitre, elles sont à usage général pour localiser des appareils, objets ou des usagers mobiles. Un ensemble de méthodes d'amélioration de la précision ont été abordées également. Les technologies citées varient d'une façon importante en termes de coût, de couverture et de précision.

Le chapitre suivant sera consacré entièrement au problème de localisation dans les réseaux de drones ainsi que les techniques et les solutions proposées pour localiser les nœuds non équipés de GPS.

Localisation relative des nœuds mobiles

Sommaire

3.1	Introduction	43
3.2	Localisation relative	43
3.2.1	Localisation relative dans les réseaux de capteur sans fil	44
3.2.2	Localisation relative dans les VANET	45
3.2.3	Localisation relative dans les réseaux Ad hoc de drones	47
3.3	RLSUAV : Relative Localization in a Swarm of UAVs	50
3.3.1	Détection des voisins à 1-saut et à 2-sauts	50
3.3.2	Détermination du système de positionnement local	51
3.3.3	Détermination du système de positionnement global	54
3.4	Simulation et analyses	55
3.4.1	Nombre de messages reçus	56
3.4.2	Taux de réussite	57
3.4.3	Erreur de localisation	58
3.5	Conclusion	59

3.1 Introduction

Les réseaux ad hoc de drones ou flotte de drones sont utilisés pour réaliser plusieurs missions comme la sécurité, la surveillance, la recherche et le sauvetage dans des environnements inconnus et dangereux. Afin de déployer une flotte de drones pour de telles applications, les drones doivent être capables de réaliser certaines tâches, tels que la prévention des collisions et le vol en formation avec un nœud leader. Ces tâches sont accomplies grâce à la connaissance de l'emplacement des drones voisins dans le groupe.

La méthode conventionnelle de détermination de la position repose principalement sur le système GPS. Par conséquent, les réseaux ad hoc de drones reposant sur des méthodes de localisation classiques (GPS) qui ne peuvent pas fonctionner dans des environnements urbains denses ou dans des environnements fermés, en raison des difficultés rencontrées pour recevoir le signal GPS des satellites. Pour cela la localisation relative a été utilisée pour aider les nœuds sans GPS à déterminer leurs positions. La localisation relative utilise la communication coopérative et le partage d'informations entre les nœuds du réseau pour aider les nœuds à estimer ou à corriger leurs positions.

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes techniques et solutions proposées pour résoudre le problème de localisation relative dans les réseaux mobiles et nous examinons en particulier les techniques de localisation relative dans les réseaux Ad hoc de drones. Ensuite, nous proposons une nouvelle technique relative qui consiste à estimer les positions des nœuds voisins en fonction des distances mesurées entre les drones et de la technique de la multilatération. Pour évaluer les performances de notre contribution, plusieurs simulations ont été faites dans différents environnements.

3.2 Localisation relative

En échangeant les distances estimées entre un nœud et ses voisins, une carte locale de position relative peut être construite. Avec cette carte de position locale, un nœud peut se localiser par rapport aux autres nœuds dans son voisinage et doit être aussi capable de localiser les nœuds voisins. Ce type de localisation relative a été utilisée principalement dans les réseaux Ad hoc, les réseaux de capteurs sans fil et les réseaux VANET, mais récemment, un certain nombre de solutions ont été proposées pour les réseaux ad hoc de drones.

3.2.1 Localisation relative dans les réseaux de capteur sans fil

Dans les réseaux de capteurs, on peut distinguer deux types de localisation : relative et absolue. En ce qui concerne le cas relatif, les nœuds capteurs utilisent des communications sans fil pour mesurer les distances entre eux en utilisant différentes techniques. Ces mesures de distance forment un ensemble de contraintes qui peuvent être utilisées pour estimer les positions des nœuds en fonction des systèmes de coordonnées locaux. Pour le positionnement absolu, un seul système de coordonnées global est donné. Pour transformer le réseau relativement positionné en un réseau positionné de manière absolue ou, en d'autres termes, pour transformer plusieurs systèmes de coordonnées locaux en un seul système de coordonnées global [70], plusieurs réflexions, rotations et translations sont nécessaires [71]. Le tableau 3.1 résume les principales caractéristiques des techniques de localisation relative dans les réseaux de capteur sans fil.

Dans [71, 72], un algorithme d'auto-positionnement nommé SPA (Self Positioning Algorithm) est proposé pour les réseaux sans fil mobiles sans aucun récepteur GPS. Dans SPA pour que chaque nœud puisse construire son système de coordonnées local, il doit choisir deux nœuds voisins, à condition que les trois nœuds ne soient pas sur la même ligne et puissent tous communiquer entre eux. Ensuite, tout autre nœud voisin peut être localisé si sa distance à chacun de ces trois nœuds peut être estimée. Après avoir choisi le groupe de nœuds ayant la densité la plus élevée du réseau comme un système de coordonnées de référence, les autres systèmes de coordonnées locaux peuvent être ajustés pour créer le système de coordonnées global par translation. L'inconvénient de SPA est que les coûts de communication et le temps de convergence croît de manière exponentielle avec l'augmentation du nombre de nœuds puisque chaque nœud construit individuellement son système de coordonnées local.

Pour surmonter les faiblesses de SPA [72], des techniques basées sur la clusterisation ont été proposées [73, 74, 75].

Dans [73], la technique (CSPA) est proposée où les nœuds sont initialisés avec différents rôles : un petit sous-ensemble de nœuds est sélectionné pour jouer le rôle des maîtres et les autres deviennent ensuite des nœuds esclaves. Chaque nœud maître construit son système de coordonnées local avec un algorithme similaire à SPA. Si deux nœuds maîtres ont deux nœuds esclaves communs ils fusionnent leurs systèmes de coordonnées locaux. Comparé au SPA, cette technique apporte une amélioration considérable en termes de coût de communication et de temps de convergence. Malheureusement, cet algorithme a un problème lors de la fusion des systèmes de coordonnées locaux car deux nœuds maîtres

peuvent ne pas être à portée l'un à l'autre.

Dans [74], une approche de la localisation relative nommée (SHARP) a été proposée dont le but est d'atteindre le point de fonctionnement requis en termes de précision et de coût. Dans SHARP et en fonction de certains critères, un ensemble de nœuds est sélectionné comme des nœuds maîtres. Ensuite, en utilisant les distances mesurées entre ces nœuds, les nœuds maîtres sont localisés relativement. Enfin, la méthode de localisation SPA [72] est utilisée pour localiser le reste des nœuds du réseau par rapport au système de coordonnées initial résultant.

Dans [75], Une technique nommée MSPA (Matrix transform-based Self Positioning Algorithm) est proposée, elle est basée sur la matrice de transformation et l'algorithme d'auto-positionnement SPA [72] pour déterminer les coordonnées des nœuds statiques dans un espace 2D ou 3D. Afin de minimiser les faiblesses de (CSPA) [73], elle utilise un nouveau facteur, qui permet de réguler le nombre de nœuds maîtres et esclaves dans les réseaux de capteurs et le degré de connectivité entre les nœuds maîtres. Une matrice de transformation est utilisée entre deux systèmes de coordonnées locaux afin de les fusionner efficacement en un système de coordonnées global.

TABLE 3.1 – Comparaison des techniques de localisation relative dans les WSNs

Technique	GPS	Type des nœuds	Clustérisation	Coût
SPA [71, 72]	Non	Mobile	Non	Élevé
CSPA [73]	Non	Mobile	Oui	Faible
SHARP [74]	Non	Mobile	Oui	Faible
MSPA [75]	Non	Statique	Oui	Faible

3.2.2 Localisation relative dans les VANET

La localisation relative a été utilisée dans ce type de réseau pour aider les véhicules à se localiser dans les environnements intérieurs (par exemple dans un tunnel) où aucune information GPS n'est disponible et elle est utilisée aussi pour aider les véhicules non équipés de GPS à se localiser.

Dans [76], un véhicule non équipé de GPS doit communiquer avec au moins trois véhicules équipés de GPS dans son voisinage pour évaluer les distances et calculer sa position. Quand le nombre de véhicules voisins équipés de GPS est moins de trois, cette technique montre comment déduire au moins la distance entre le véhicule non équipé de GPS et l'endroit de l'accident produit et ceci avec les informations disponibles.

Dans [77], Parker et al ont proposé un nouvel algorithme distribué qui a pour but d'évaluer la position des véhicules en réduisant le résiduel de la distance euclidienne. L'algorithme proposé travaille comme suit : Chaque nœud estime les distances aux véhicules voisins, utilisant une technique radio (par exemple. RSSI), partage ensuite cette information avec ses voisins à un saut. Utilisant cette information à un saut, chaque véhicule exécute une procédure pour déterminer son système de coordonnées local et d'évaluer les coordonnées relatives $((x_i, y_i))$ de tous ses voisins. Une fois que les positions de tous les véhicules sont évaluées, la configuration du réseau de véhicules est connue pour ce véhicule.

La solution proposée dans [78] a pour but d'établir une carte précise des positions relatives de tous les véhicules voisins sans aucun GPS et de diffuser les positions calculées en temps réel. L'approche, utilise essentiellement (i) une technique de clusterisation (pour grouper plusieurs véhicules dans un cluster et établir des associations Maître/Esclave entre les nœuds), (ii) une technique pour estimer les distances entre les paires des véhicules du groupe (RSSI) et (iii) une technique pour déterminer les positions relatives des véhicules dans un groupe.

Dans [30], nous avons proposé une nouvelle technique de localisation relative pour les réseaux VANET. Elle est basée essentiellement sur une technique de clusterisation (pour grouper les véhicules et choisir des véhicules pour être cluster-heads) et une technique d'établissement des positions relatives des nœuds voisins (où chaque cluster-head établit son système de coordonnées de tous ses voisins dans le groupe) utilisant les distances mesurées entre les véhicules. Les distances entre les véhicules sont calculées en utilisant la technique de puissance du signal reçu (RSSI).

Le principe de cette technique consiste à sélectionner un premier cluster-head et à calculer les positions relatives de tous ses voisins dans le groupe. Ensuite, selon le premier cluster-head et son système de coordonnées local, les autres cluster-heads (CHs) ont été choisis et le système de coordonnées global est déterminé.

Le tableau 3.2 résume les principales caractéristiques des techniques de localisation relative dans les réseaux VANETs.

TABLE 3.2 – Comparaison des techniques de localisation relative dans les VANETs

Technique	GPS	Clustérisation	Système de coordonnées	Coût
[76]	Oui	Non	Global	Faible
[77]	Non	Non	Local	Élevé
[78]	Non	Oui	Local	Faible
[30]	Non	Oui	Global	Faible

3.2.3 Localisation relative dans les réseaux Ad hoc de drones

L'avantage principal des drones (UAV) qui les rend utiles dans de nombreux domaines d'application est leur capacité à être programmés pour effectuer des tâches de manière autonome. Le système de localisation est l'un des modules critiques de drones autonomes pour l'exécution des tâches automatisées. Pour les environnements extérieurs, la planification de vol autonome est moins difficile, car le module de localisation est basé sur des systèmes de positionnement global (GPS), qui sont assez fiable pour la localisation et la navigation. Par conséquent, dans les environnements intérieurs, le service GPS n'est pas disponible ou n'est pas suffisamment fiable et précis.

Le problème de la localisation des drones dans les environnements intérieurs a été étudié au cours de ces dernières années. En fonction de l'approche utilisée, les solutions proposées dans la littérature peuvent être classées en trois groupes :

- Solutions basées sur les mesures des dispositifs embarqués dans chaque drone (caméra, INS, Bluetooth,...) ;
- Solutions basées sur les mesures des équipements installés dans l'environnement (point d'accès Wireless Fidelity (Wi-Fi), Ultra Wide Band (UWB)) ;
- Solutions hybrides qui combinent les deux groupes.

Dans [79], Ibrahim et Moselhi ont présenté un nouveau système de localisation pour les environnements intérieurs. Ce système utilise un microcontrôleur équipé d'un système de navigation inertielle (INS). L'INS contient un groupe de capteurs : accéléromètre, gyroscope et magnétomètre. Le microcontrôleur utilise un algorithme de matrice de cosinus pour calculer l'accélération à l'aide d'équations de mouvement, La position actuelle est calculée en utilisant le filtre de Kalman pour fusionner les données des capteurs. Cependant, la localisation basée sur l'INS accumule rapidement les erreurs et par conséquent,

elle est très risquée et peut entraîner de graves dangers, tels que la perte de contrôle et la collision avec des objets dans l'environnement.

Afin de résoudre le problème de collision dans les réseaux Ad hoc de drones, un nouveau système de localisation relative a été proposé dans [80]. Le système proposé exploite la communication entre les membres de l'équipe afin d'échanger les états suivants : la vitesse du drone dans l'espace, son orientation par rapport au nord et sa hauteur par rapport au sol. Avec la communication Bluetooth, un drone peut mesurer la puissance du signal reçu (RSSI) indiquant la distance relative par rapport aux autres drones. Chaque drone fusionne les états reçus, le RSSI et ses propres états intégrés pour obtenir une estimation relative de l'emplacement et les mouvements de tous les autres membres de l'équipe.

D'autres systèmes de localisation relative sont basés sur les informations visuelles [81, 66]. Par exemple dans [81], les auteurs ont proposé un système coopératif de localisation pour les réseaux Ad hoc de drones utilisant une détection d'information basée sur la vision. Chaque drone est équipé de caméra pour détecter son environnement et estimer les positions relatives entre eux au moyen de la géométrie à vues multiples. L'inconvénient de l'utilisation d'une seule caméra pour chaque drone est que l'angle de vue est limité, par conséquent, le système de localisation ne peut fournir des mesures de position relative entre tous les drones. Pour cela, dans [66], les auteurs ont proposé d'intégrer les informations d'un module de caméra embarqué avec les données d'une unité de mesure inertielle (INS) pour fournir des positions relatives de tous les membres de groupe. Cependant, L'utilisation de (INS) accumule rapidement les erreurs de position où l'erreur peut atteindre 1.4% de la distance totale parcourue [79].

Les solutions basées sur les informations visuelles sont généralement très lentes, consomment plus d'énergie et nécessitent des algorithmes de reconnaissance de formes appropriés. Par contre l'utilisation des mesures dérivées des signaux tels que UWB et des signaux des points d'accès dans les systèmes de localisation en milieu urbain et à l'intérieur s'avère meilleur. L'UWB peut également être utilisé pour le positionnement des nœuds mobiles où des balises UWB émettraient des données, qui seraient reçues par des nœuds récepteurs dans l'environnement. Ces derniers évaluent la distance des balises par mesure du temps de propagation des signaux, ce qui permet de calculer leurs positions par trilatération.

Afin de réaliser la localisation des nœuds drones à l'intérieur, des stations de base ont été utilisées dans [82]. Ce système utilise la technique de la différence du temps d'arrivée (TDoA) pour mesurer la distance entre les drones et les quatre stations de base installées dans les quatre coins de la zone de déploiement. Puisque, le modèle de mesure TDoA

obtenu est non linéaire, la position d'un drone est estimée à l'aide de filtre de Kalman étendu (EKF).

Un autre système basé sur les points d'accès est proposé dans [83]. Il est basé sur les mesures de distance entre les drones et une infrastructure constituée des points d'accès Wi-Fi où leurs emplacements peuvent être aléatoire sans aucune restriction. Les points d'accès diffusent périodiquement leurs positions, chaque drone stocke les positions des points d'accès et calcule sa position en se basant sur les mesures de RSSI.

Dans [84], un nouveau système coopératif de localisation dans les réseaux Ad hoc de drones est proposé. Ce système utilise l'INS, des nœuds statiques UWB et des points d'accès Wi-Fi. Il est basé essentiellement sur l'échange d'informations entre plusieurs nœuds statiques (les UWB et les points d'accès) et dynamiques (les drones). Afin d'obtenir une solution de localisation intérieur, chaque nœud drone mesure les distances à partir des UWB statiques et à partir des drones voisins, il mesure aussi la puissance du signal reçu à partir des points d'accès Wi-Fi et utilise le filtre de Kalman étendu (EKF) pour fusionner toutes ces mesures.

Le tableau 3.3 résume les principales caractéristiques des techniques de localisation relative dans les réseaux FANETs.

TABLE 3.3 – Comparaison des techniques de localisation relative dans les FANETs

Technique	Capteurs	Technologie	Tech. de mesure	Tech. de fusion	Communication
[79]	INS	Non	Non	KF	Non
[80]	INS	Bluetooth	RSSI	EKF	Oui
[81]	Caméra	Non	Non	Géométrie	Oui
[66]	Caméra, INS	Non	Estimation	Géométrie	Oui
[82]	Non	Stations de base	TDoA	EKF	Oui
[83]	Non	Wi-Fi	RSSI	Non	Oui
[84]	INS	Wi-Fi, UWB	RSSI	EKF	Oui

Toutes les techniques proposées pour résoudre le problème de localisation relative dans les réseaux de drones sont basées essentiellement sur des infrastructures fixes ou sur des capteurs embarqués dans les drones. Par conséquent, elles sont très coûteuses, lentes, consomment beaucoup d'énergie et nécessitent des techniques de fusion efficaces pour fusionner les différentes mesures captées. Dans la suite, nous proposons une nouvelle technique de localisation relative qui ne nécessite aucune infrastructure installée ou de dispositifs supplémentaires. Elle se base seulement sur l'échange des distances estimées entre les drones.

3.3 RLSUAV : Relative Localization in a Swarm of UAVs

Notre technique RLSUAV a pour but d'établir une carte précise des positions relatives de tous les nœuds drones de réseau dans un environnement sans GPS (par exemple tunnel ou mine). Elle est basée essentiellement sur une technique d'établissement des positions relatives des nœuds voisins qui utilise les distances mesurées entre les drones et la technique de Multilateration. Ces distances sont calculées en utilisant la technique de puissance du signal (RSSI). Notre contribution est exécutée en trois phases : phase de détection des voisins à 1-saut et à 2-sauts, phase de construction du système de positionnement local et la dernière phase de construction du système de positionnement global.

3.3.1 Détection des voisins à 1-saut et à 2-sauts

Cette phase permet au nœud initiateur M (la station sol peut jouer le rôle du nœud initiateur M) de détecter ses voisins à 1-saut et à 2-sauts, et permet aussi de calculer les distances entre les nœuds drones. Pour cela, le nœud initiateur M diffuse un message de type REQ à tous ses voisins, Chaque nœud voisin (à 1-saut) qui reçoit ce message le diffuse à tous ses voisins (Voir la figure 3.1).

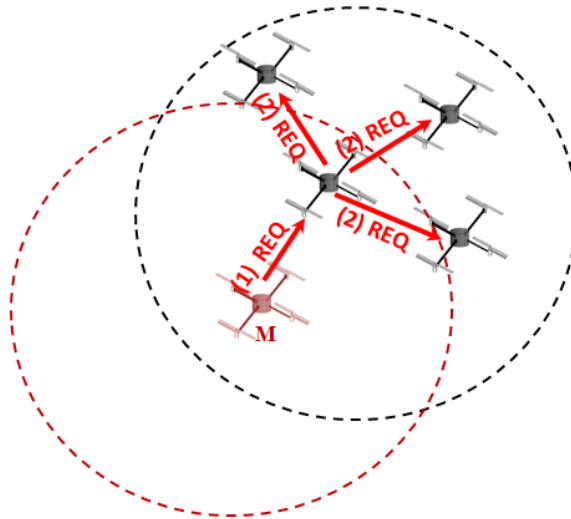


FIGURE 3.1 – Diffusion des messages REQ

Chaque nœud voisin à 2-sauts du nœud M qui reçoit un message de type REQ, répond par un message de type REP. Quand un nœud voisin à 1-saut du nœud initiateur reçoit

des messages de type REP de tous ses voisins, il les agrège en un seul message de type REP_N (qui contient la liste de tous ses voisins ainsi que la distance le séparant de chaque voisin) et l'envoie au nœud initiateur (Voir la figure 3.2). À la réception de ce message (REP_N), le nœud initiateur M peut calculer les distances le séparant de tous ses voisins à 1-saut et à 2-sauts.

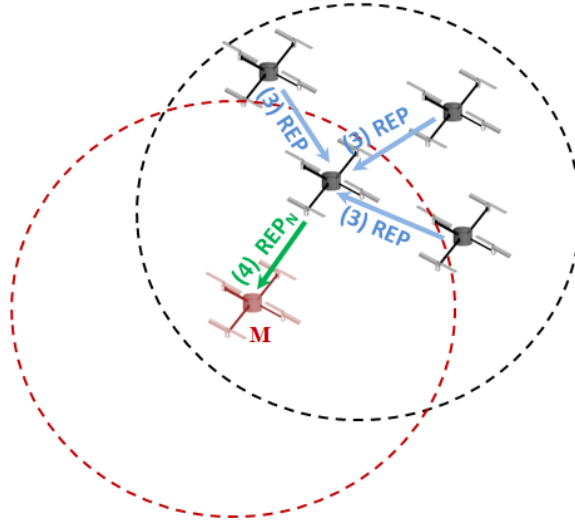


FIGURE 3.2 – Diffusion des messages REP et REP_N

3.3.2 Détermination du système de positionnement local

Cette étape permet au nœud initiateur de calculer les positions de ses voisins à 1-saut. Pour cela, le nœud initiateur M va choisir trois voisins A , B et C (Voir la figure 3.3) tels que :

1. Les nœuds M , A , B et C peuvent communiquer entre eux ;
2. Le nœud A se trouve sur l'axe des abscisses (X) et a une composante A_x positive ;
3. Le nœud B est un voisin commun de M et A et a une composante B_y positive ;
4. Le nœud C est un voisin commun de M , A et B et a une composante C_z positive ;
5. Les nœuds M , A , B et C ne sont pas coplanaires (ne se trouvent pas sur le même plan).

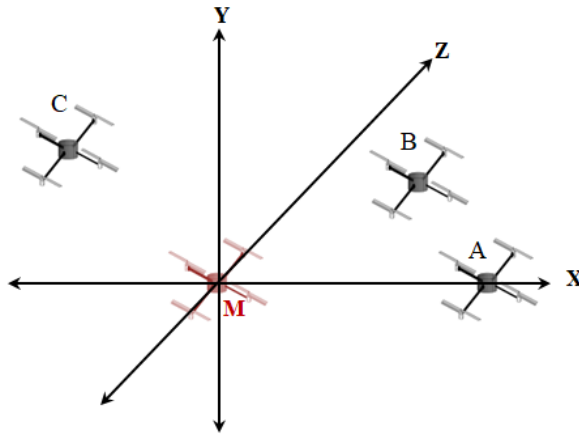


FIGURE 3.3 – Choix des nœuds A, B et C

Le nœud M envoie un message de confirmation aux nœuds A , B et C pour qu'ils calculent leurs positions. À la réception de ce message l'algorithme suivant est exécuté :

1. Le nœud A calcule sa position $A(A_x, A_y, A_z)$ et la diffuse à tous ses voisins :

$$\begin{cases} A_x = d_{MA} \\ A_y = 0 \\ A_z = 0 \end{cases}$$

2. Le nœud B reçoit la position de A , il calcule sa distance par rapport à ce dernier (d_{AB}). Ensuite, il calcule sa position $B(B_x, B_y, B_z)$ (Voir la figure 3.4) et la diffuse à tous ses voisins :

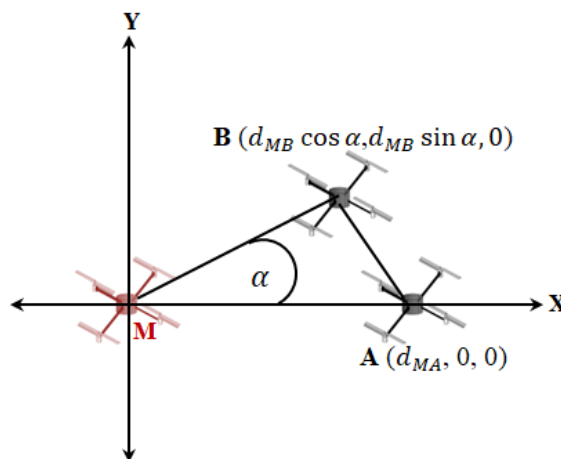


FIGURE 3.4 – Positions des nœuds A et B

$$\begin{cases} B_x = d_{MB} * \cos \alpha \\ B_y = d_{MB} * \sin \alpha \\ B_z = 0 \end{cases}$$

Où α est l'angle \hat{AMB} et il est calculé par la formule suivante :

$$\alpha = \frac{d_{MB}^2 + d_{MA}^2 - d_{AB}^2}{2d_{MB}d_{MA}}$$

3. Quand le nœud C reçoit les trois positions des nœuds M , A et B , il calcule sa position $C(C_x, C_y, C_z)$ en utilisant la technique de trilatération (Voir la figure 3.5) et la diffuse à tous ses voisins.

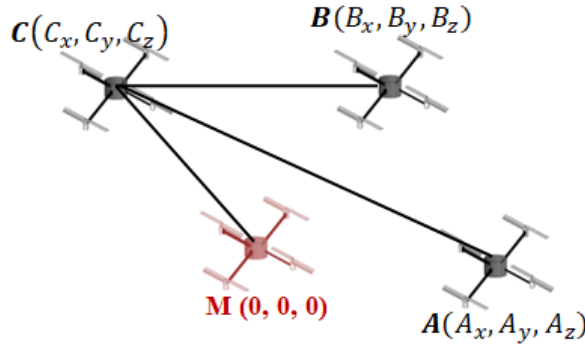


FIGURE 3.5 – Position du nœud C (Trilatération)

Pour calculer la position du nœud C , il suffit de résoudre le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 = d_{MC}^2 & (3.1a) \\ (C_x - d_{MA})^2 + C_y^2 + C_z^2 = d_{AC}^2 & (3.1b) \\ (C_x - d_{MB} * \cos \alpha)^2 + (C_y - d_{MB} * \sin \alpha)^2 + C_z^2 = d_{BC}^2 & (3.1c) \end{cases}$$

- En soustrayant l'équation 3.1b de l'équation 3.1a, on obtient la valeur de C_x :

$$(3.1a) - (3.1b) \Rightarrow C_x = \frac{d_{MC}^2 + d_{MA}^2 - d_{AC}^2}{2 * d_{MA}}$$

- En soustrayant l'équation 3.1c de l'équation 3.1a, on obtient la valeur de C_y :

$$(3.1a) - (3.1c) \Rightarrow C_y = \frac{d_{MC}^2 + d_{MB}^2 - d_{BC}^2 - 2 * C_x * B_x}{2 * B_y}$$

- En remplaçant C_x et C_y dans l'équation 3.1a, on obtient la valeur de C_z :

$$(3.1a) \Rightarrow C_z = \pm \sqrt{d_{MC}^2 - C_x^2 - C_y^2}$$

- Puisque on a déjà supposé que le nœud C a une composante C_z positive. Alors,

$$C_z = + \sqrt{d_{MC}^2 - C_x^2 - C_y^2}$$

3.3.3 Détermination du système de positionnement global

Après la détermination du système de positionnement local, chaque nœud (par exemple le nœud D) voisin de M , A , B et C doit calculer sa position en utilisant les positions de ces derniers ainsi que la distance qui le sépare de ces nœuds pour appliquer la technique de multilatération (Voir la figure 3.6). Donc, il suffit de résoudre le système d'équations suivant, où on a trois inconnus D_x, D_y et D_z et quatre équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} D_x^2 + D_y^2 + D_z^2 = d_{MD}^2 \quad (3.2a) \\ (D_x - A_x)^2 + (D_y - A_y)^2 + (D_z - A_z)^2 = d_{AD}^2 \quad (3.2b) \\ (D_x - B_x)^2 + (D_y - B_y)^2 + (D_z - B_z)^2 = d_{BD}^2 \quad (3.2c) \\ (D_x - C_x)^2 + (D_y - C_y)^2 + (D_z - C_z)^2 = d_{CD}^2 \quad (3.2d) \end{array} \right.$$

Périodiquement, les nœuds M , A , B , C et D mettent à jour leurs positions et ils les diffusent à tous leurs voisins. Un nœud drone recevant les messages de ses voisins peut donc calculer sa position (x, y, z) si et seulement s'il reçoit quatre positions des nœuds différents (Voir la figure 3.6). Cependant, il peut calculer seulement les composantes x et y s'il reçoit trois positions (Voir la figure 3.5).

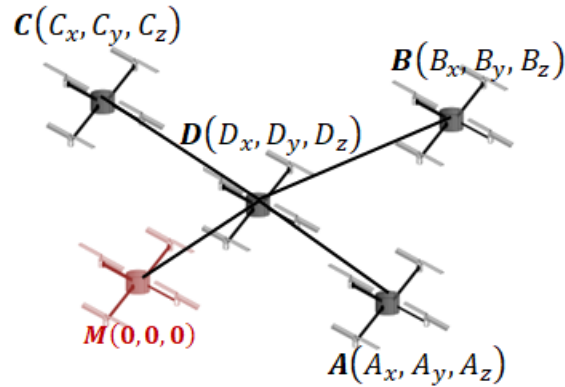


FIGURE 3.6 – Position du nœud D (Multilatération)

3.4 Simulation et analyses

Pour implémenter RLSUAV, nous avons choisi d'utiliser le simulateur Cooja dans Instant Contiki 2.7. Puis, nous avons évalué RLSUAV dans différents environnements et en variant plusieurs paramètres tels que le nombre de messages reçus, l'erreur de localisation et le taux de réussite (pourcentage de localisation des nœuds).

Dans nos simulations et pour chaque paramètre, nous avons utilisé deux modèles de propagation radio différents. Le premier est le modèle de propagation radio UDGM (Unit Disk Graph Medium) dans lequel la portée de transmission est un disque idéal dans lequel les nœuds en dehors du disque ne reçoivent pas de paquets, tandis que les nœuds dans ce disque reçoivent tous les paquets. Le second est le modèle de propagation radio Multi-Path Ray-tracer Medium (MRM) dans lequel nous avons varié le nombre d'obstacles.

Le Tableau 3.4 résume les principaux paramètres de simulation utilisés :

TABLE 3.4 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeur
Model de propagation Radio	Unit Disk Graph Medium UDGM : Distance Loss
	Multi-path Ray-tracer Medium (MRM)
Taille de réseau (mXmXm)	100X100X5
Nombre de drones	[20, 100]
Portée de transmission (m)	[60, 80]
Nombre d'obstacles	[3, 9]

3.4.1 Nombre de messages reçus

Le nombre de messages reçus est un paramètre important dans les techniques de localisation, car il influe sur le taux de réussite de la localisation des nœuds. Afin d'étudier les performances de notre technique par rapport à ce paramètre, nous l'avons évaluée dans différents environnements.

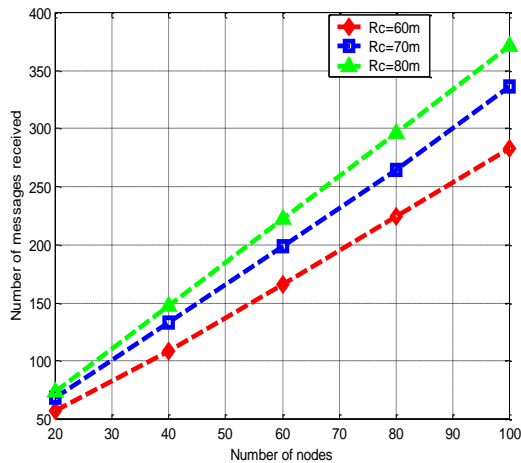


FIGURE 3.7 – Nombre de messages reçus en fonction de nombre de nœuds

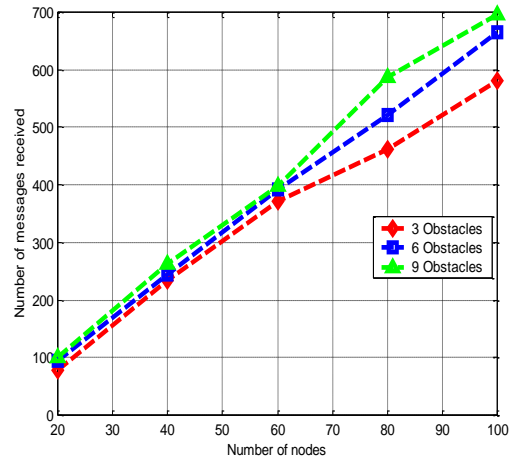


FIGURE 3.8 – Nombre de message reçus dans un environnement multi-trajets

La figure 3.7 représente le nombre de messages reçus dans le modèle de propagation radio UDGM et avec différentes valeurs de la portée de communication (60m, 70m et 80m). Nous remarquons sur cette figure que le nombre de messages reçus augmente avec l'augmentation du nombre de nœuds et également avec l'augmentation de la portée de communication, en raison de l'augmentation du nombre des voisins de chaque nœud récepteur.

D'autre part, la figure 3.8 représente le nombre de messages reçus dans un environnement multi-trajets et avec différentes valeurs d'obstacles (3, 6 et 9 obstacles). Nous remarquons également que le nombre de messages reçus augmente tout en augmentant le nombre d'obstacles ou en augmentant le nombre de nœuds. Ceci est dû principalement au fait que lorsque le nombre d'obstacles augmente, le message prend plusieurs chemins pour atteindre la destination donc, il reçoit le même message plusieurs fois ce qui augmente le nombre de messages reçus.

3.4.2 Taux de réussite

Le taux de réussite de la localisation fait également partie des principaux paramètres d'évaluation de la performance des techniques de localisation, où il est fortement influencé par le nombre de messages reçus. En utilisant la même stratégie, nous comparons le taux de réussite de notre méthode proposée pour différentes portée de communication et différents nombre d'obstacles.

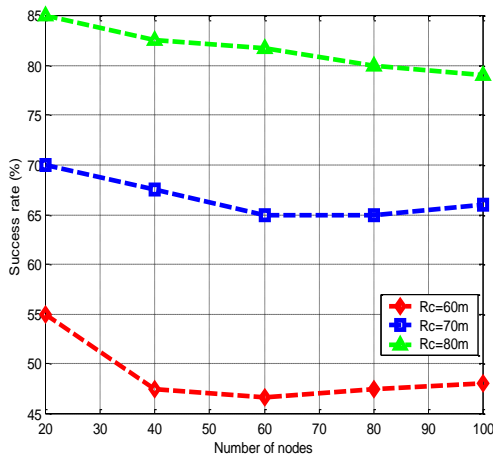


FIGURE 3.9 – Taux de réussite en fonction de nombre de nœuds

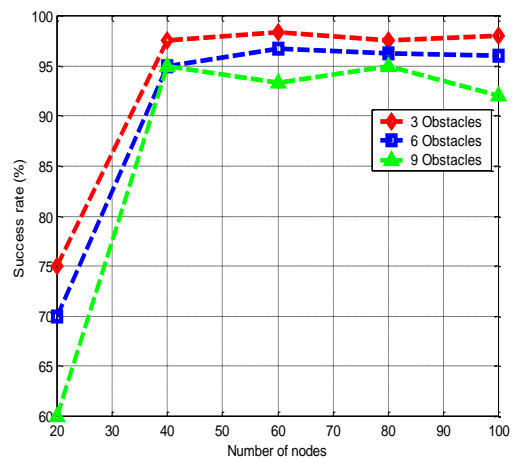


FIGURE 3.10 – Taux de réussite dans un environnement multi-trajets

La figure 3.9 montre que pour les différentes densités des nœuds, notre méthode RL-SUAV avec $R_c = 80m$ a plus de succès car les nœuds reçoivent plus de messages et peuvent donc calculer leurs positions. Par exemple, le taux de réussite moyen de la localisation est égal à 81.63% si $R_c = 80m$, 66.7% si $R_c = 70m$ et 48.93% si $R_c = 60m$.

Afin de montrer les performances de la technique proposée dans un environnement multi-trajets, nous avons calculé le taux de réussite avec le modèle de propagation radio MRM et nous avons varié le nombre d'obstacles de 3 à 9.

La figure 3.10 montre que pour les différentes densités des nœuds, notre méthode RL-SUAV offre meilleures performances si nous avons moins d'obstacles. Ceci peut s'expliquer par le problème de multi-trajets qui diminue le nombre de paquets de bonne qualité et, par conséquent, certains nœuds ne peuvent pas recevoir le nombre nécessaire de messages pour calculer leurs positions. Par exemple, le taux de réussite moyen est égal à 93.26% dans un environnement avec 3 obstacles, 90.78% avec 6 obstacles et 87.06% avec 9 obstacles.

3.4.3 Erreur de localisation

L'erreur de localisation est un autre indicateur de performance que nous évaluons dans cette section. La précision de la localisation est fortement influencée par l'estimation de la distance, où l'inexactitude dans la distance estimée augmente l'erreur de localisation des nœuds. Cette erreur est calculée comme suit :

$$\text{Erreur de localisation} = |d - \hat{d}|$$

Où, d et \hat{d} sont la distance réelle et estimée entre un nœud drone et le nœud initiateur M .

$$d = \sqrt{(x_A - x_M)^2 + (y_A - y_M)^2 + (z_A - z_M)^2}$$

$$\hat{d} = \sqrt{(\hat{x}_A - \hat{x}_M)^2 + (\hat{y}_A - \hat{y}_M)^2 + (\hat{z}_A - \hat{z}_M)^2}$$

Où (x_A, y_A, z_A) et (x_M, y_M, z_M) sont les positions réelles des nœuds A et M . $(\hat{x}_A, \hat{y}_A, \hat{z}_A)$ et $(\hat{x}_M, \hat{y}_M, \hat{z}_M)$ sont les positions estimées des nœuds A et M .

Dans les figures 3.11 et 3.12, nous comparons l'erreur de localisation pour différentes portée de communication et différents nombres d'obstacles.

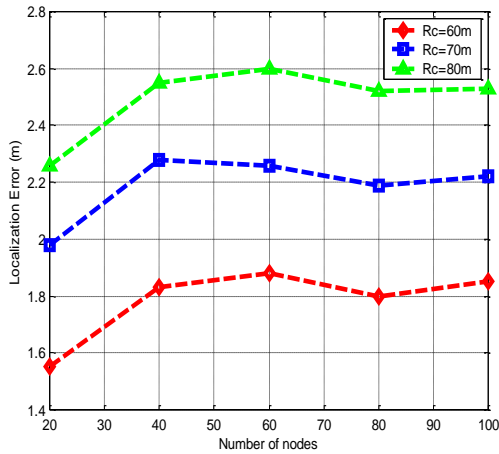


FIGURE 3.11 – Erreur de localisation en fonction de nombre de nœuds

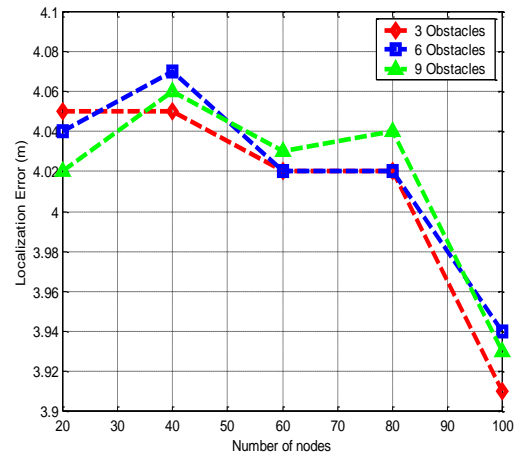


FIGURE 3.12 – Erreur de localisation dans un environnement multi-trajets

La figure 3.11 montre que pour toutes les valeurs du nombre de nœuds, l'erreur de localisation augmente tout en augmentant la portée de transmission. Cela est dû principalement au fait que lorsque la portée de transmission augmente, la distance entre le nœud initiateur et les autres nœuds de drones augmente aussi, ce qui génère des erreurs

de localisation plus importantes. Par exemple, l'erreur de localisation moyenne est égale à $1.77m$ pour $R_c = 60m$, $2.18m$ pour $R_c = 70m$ et $2.49m$ pour $R_c = 80m$.

D'autre part, la figure 3.12 montre l'erreur de localisation de RLSUAV dans un environnement multi-trajets avec différentes valeurs d'obstacles. Nous remarquons que pour toutes les valeurs du nombre de nœuds, RLSUAV offre presque les mêmes performances en termes d'erreur de localisation et ceci pour différentes valeurs d'obstacles. Où, l'erreur de localisation moyenne est égale à $4.01m$ et cela pour différents scénarios.

3.5 Conclusion

Une flotte de drones est un domaine d'application très important pour la localisation relative. Il s'agit d'un problème clé à résoudre pour permettre la coordination des mouvements entre les drones pour l'exécution des tâches.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents protocoles de localisation des nœuds qui ont été proposés pour assurer le service de localisation relative dans les réseaux mobiles et qui peuvent être appliqués dans les réseaux FANET. Ensuite, nous avons proposé une nouvelle technique de localisation relative (RLSUAV) qui ne nécessite aucune information GPS et par conséquent elle peut être utilisée dans les environnements intérieurs. Elle consiste à estimer les positions des nœuds drones en fonction des distances mesurées entre eux et de la technique de la multilatération, où les distances entre les drones sont calculées à l'aide de la puissance du signal reçu (RSSI). Les résultats de la simulation ont montré l'efficacité de RLSUAV dans différents environnements (avec et sans multi-trajets).

Le chapitre suivant sera dédié au problème de localisation dans les réseaux de capteurs sans fil et en particulier aux techniques de localisation à l'aide d'un nœud mobile équipé de GPS.

Localisation à l'aide d'un nœud mobile

Sommaire

4.1	Introduction	62
4.2	Importance de la localisation dans les RCSF	63
4.3	Algorithmes de localisation dans les RCSF	63
4.4	Algorithmes de localisation à l'aide d'une ancre mobile dans les RCSF	64
4.5	Les trajectoires des ancres	65
4.5.1	Trajectoire aléatoire (RWP)	65
4.5.2	Trajectoire de Scan	66
4.5.3	Trajectoire de Double Scan	67
4.5.4	Trajectoire de Hilbert	67
4.5.5	Trajectoire de Cercles	68
4.5.6	Trajectoire de LMAT	68
4.5.7	Synthèse	69
4.6	Localisation avec une ancre-Hilbert	70
4.6.1	Définitions	70
4.6.2	Principe de la localisation avec une ancre-Hilbert	73

4.7	Nos techniques d'optimisation de la trajectoire de Hilbert	73
4.7.1	La zone de couverture Z	73
4.7.2	OHPL : Optimization of Hilbert Path Length	74
4.7.2.1	Trajectoire de l'ancre mobile	75
4.7.2.2	Longueur de trajectoire (L_2)	77
4.7.2.3	Efficacité de trajectoire	78
4.7.2.4	Nombre d'ancres virtuelles (N_2)	78
4.7.3	OHPE : Optimization of Hilbert Path Energy	79
4.7.3.1	Trajectoire de l'ancre mobile	79
4.7.3.2	Longueur de trajectoire (L_3)	81
4.7.3.3	Efficacité de trajectoire	81
4.7.3.4	Nombre d'ancres virtuelles (N_3)	82
4.8	Simulation et analyses	82
4.8.1	Longueur de trajectoire et nombre d'ancres virtuelles	83
4.8.2	Nombre de messages reçus	84
4.8.3	Énergie consommée	85
4.8.4	Erreur de localisation	86
4.8.5	Taux de réussite de localisation	87
4.8.6	Environnement multi-trajets	88
4.9	Conclusion	90

4.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont utilisés pour réaliser une tâche spécifique d'une application. Ils sont devenus de plus en plus populaires grâce à leur large champ d'applications civiles et militaires : environnement, agriculture, météorologie, santé, domotique, etc.

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

La localisation des nœuds est l'un des services les plus importants. Elle consiste à déterminer la position physique (latitude, longitude et altitude) pour chaque capteur. La localisation à l'aide d'une ancre mobile est largement utilisée pour localiser des nœuds capteurs, où une ancre mobile n'est qu'un nœud capteur qui connaît à priori ses coordonnées (à l'aide d'un récepteur GPS) et qui a une énergie suffisante pour qu'il puisse traverser sa zone d'intérêt et diffuser des paquets qui contiennent sa position. Un nœud inconnu recevant trois paquets (ou plus), peut estimer sa position en utilisant la technique de trilatération (ou multilatération).

La localisation à l'aide d'une ancre mobile a de nombreux avantages en termes de coût réduit, de précision élevée et de faible consommation d'énergie. Le défi principal de cette technique est de trouver la trajectoire optimale des ancres mobiles et de déterminer la position adéquate pour diffuser les paquets de position par les ancres.

Ce chapitre présente nos deux contributions (OHPL et OHPE) pour la localisation dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous commençons par montrer l'importance de la localisation, les algorithmes de localisation des capteurs ainsi que les différentes trajectoires proposées pour la localisation à l'aide d'une ancre mobile. Ensuite, nous introduisons nos deux contributions de localisation à l'aide d'une ancre mobile : La première nommée Optimization of Hilbert Path Length (OHPL), elle vise à minimiser la longueur de la trajectoire des ancres mobiles, à déterminer la position des ancres virtuelles, à garantir que tous les nœuds puissent recevoir au moins quatre messages pour se localiser et à améliorer la précision des positions. La deuxième contribution Optimization of Hilbert Path Energy (OHPE), vise à définir une trajectoire optimale de l'ancre mobile, à minimiser le nombre de messages reçus et à réduire la consommation d'énergie des nœuds capteurs.

4.2 Importance de la localisation dans les RCSF

La localisation dans les RCSF où les capteurs sont déployés de manière aléatoire consiste à déterminer les coordonnées géographiques des différents capteurs. La localisation des nœuds est nécessaire, non seulement pour localiser les différents événements survenus dans la zone surveillée, mais aussi pour le développement de protocoles de routage de l'information récoltée, pour la couverture de la zone d'intérêt, pour l'agrégation des données, etc. Elle est la première tâche exécutée par les nœuds après leur déploiement.

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 ?).

La localisation est importante pour plusieurs applications et services, parmi lesquels :

- Après que les données soient collectées, il est important d'identifier la région d'où viennent ces données.
- Fusion et agrégation des données collectées par les nœuds intermédiaires et qui proviennent de la même région (même position).
- Utilisation de la position des nœuds comme identifiant unique dans le réseau (protocoles de routage géographique).
- Contrôle et évaluation de la couverture, la topologie et la densité des nœuds.
- Le suivi des objets mobiles (tracking).

4.3 Algorithmes de localisation dans les RCSF

Les algorithmes de localisation dans les RCSF peuvent être classés en quatre catégories [85, 86, 87, 88, 89] :

- Algorithmes à ancres statiques et nœuds statiques : Les algorithmes de cette catégorie sont soit de type Range-based ou Range-free [90]. Dans les algorithmes de type Range-based, des mesures de distance ou d'angle (en utilisant l'une des techniques de mesure de distance (RSSI, AoA, ToA)) entre les nœuds à localiser et les ancres sont nécessaires pour estimer la position d'un nœud. Par contre, les algorithmes de Range-free n'exigent aucune mesure de distance ou d'angle entre les

nœuds. Ils estiment la distance entre deux nœuds suivant l'information de connectivité (le nombre de sauts radio (RHC) ou MinMax).

- Algorithmes à ancres statiques et nœuds mobiles : Le calcul de position des nœuds mobiles dans cette catégorie est prédictif ou à base de clusters [91]. Les algorithmes prédictifs consistent à prédire les positions des nœuds mobiles en se basant sur leur historique. Dans les algorithmes à base de clusters, le réseau est divisé en plusieurs clusters, et chaque ancre gère son propre cluster et localise les nœuds se trouvant dans ce dernier.
- Algorithmes à ancres mobiles et nœuds statiques : La plupart des algorithmes de cette classe changent le problème de localisation en un problème géométrique où le calcul des coordonnées des nœuds inconnus est basé sur les relations géométriques entre les ancres mobiles et les nœuds fixes [92]. Les algorithmes de cette classe consistent à définir une trajectoire optimale de l'ancre mobile qui assure une couverture et une localisation maximale, ce qui permet de réduire le coût de réseau et d'offrir plus de précision.
- Algorithmes à ancres mobiles et nœuds mobiles : Dans le cas où tous les nœuds sont mobiles, l'environnement (où les nœuds sont déployés) devient une contrainte pour la mobilité des nœuds. Cependant, les algorithmes de cette classe deviennent très compliqués et nécessitent de définir des modèles de mobilité pour assurer la couverture totale de réseaux et pour éviter les collisions entre les nœuds.

4.4 Algorithmes de localisation à l'aide d'une ancre mobile dans les RCSF

Une solution prometteuse pour localiser les nœuds dans les RCSF est d'utiliser une ancre mobile. Le déploiement d'un grand nombre des ancres statiques nécessite plus de coût et une forte consommation d'énergie. Ce qui conduit à l'utilisation d'une seule ancre mobile au lieu d'avoir plusieurs ancres statiques. Cette ancre (équipée d'un récepteur GPS), circule dans sa zone d'intérêt en diffusant les informations nécessaires aux nœuds pour les aider à se localiser. La taille d'une ancre est beaucoup plus grande que la taille d'un capteur simple et, par conséquent, l'ancre mobile n'est pas limitée en énergie comme c'est le cas d'un simple nœud capteur.

L'algorithme de la localisation avec ancre mobile est constitué de trois phases essentielles : définition de la trajectoire, estimation des distances et calcul des positions [85].

- La phase de définition de la trajectoire est la phase la plus importante dans le processus de localisation avec une ancre mobile. Elle consiste à définir le chemin à suivre par l'ancre mobile et les instants de diffusion de leur coordonnées afin d'assurer la localisation de tous les nœuds.
- La deuxième phase du processus de localisation avec une ancre mobile consiste à estimer la distance entre l'ancre et les nœuds en utilisant l'une des méthodes discutées précédemment comme RSSI, ToA, etc.
- La troisième phase consiste à calculer les positions des nœuds, elle est exécutée soit par l'ancre mobile (localisation à distance) soit par les nœuds eux mêmes (auto-localisation). Dans la plupart des cas, ce sont les nœuds qui calculent leurs positions pour réduire les communications et la consommation d'énergie.

Dans la suite, nous détaillons la phase de définition de la trajectoire et nous décrivons les différentes trajectoires proposées dans la littérature pour la localisation des capteurs à l'aide d'une ancre mobile.

4.5 Les trajectoires des ancres

La phase de définition de la trajectoire est la phase principale lors du développement des algorithmes de localisation à base des ancres mobiles. Cette phase comporte, le choix de la trajectoire, et la définition des positions à partir desquelles l'ancre mobile diffuse ses paquets de position.

L'objectif de cette phase est d'assurer la couverture de la zone d'intérêt et de fournir des paquets contenant les coordonnées. Pour assurer la couverture du réseau, il faut que tous les nœuds capteurs reçoivent au moins trois de ces paquets pour qu'ils puissent se localiser.

4.5.1 Trajectoire aléatoire (RWP)

Le modèle de mobilité aléatoire Random way point (RWP) [93] est un modèle largement utilisé en raison de sa simplicité, où l'ancre mobile choisit une destination aléatoire et se dirige vers cette destination. Dans [94], les auteurs ont utilisé ce modèle pour faciliter la

localisation de nœuds statiques. Le message de position de l'ancre est transmis par l'ancre mobile à chaque destination. Le principal inconvénient du modèle de mobilité RWP est la couverture partielle et non uniforme de la zone d'intérêt. Il est tout à fait évident que certains points peuvent être visités plusieurs fois par l'ancre mobile alors que certains points ne sont jamais visités (Voir la Figure 4.1). Un autre problème est que la longueur de la trajectoire parcourue par l'ancre mobile n'est pas possible à formuler. Les problèmes de la colinéarité devraient être minimaux dans le RWP en raison du mouvement aléatoire de l'ancre mobile.

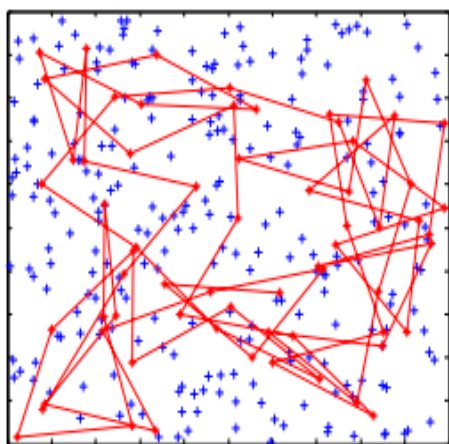


FIGURE 4.1 – Trajectoire aléatoire (RWP)

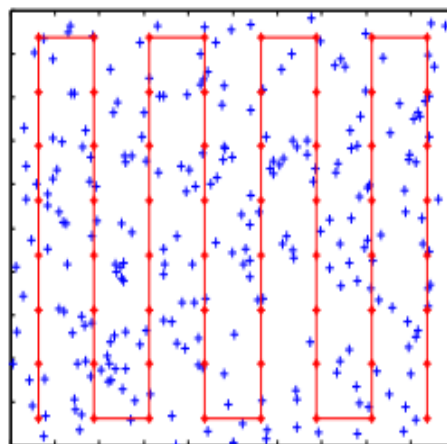


FIGURE 4.2 – Trajectoire de Scan

4.5.2 Trajectoire de Scan

Dans [95], les auteurs ont proposé une nouvelle trajectoire nommée Scan. Elle est simple et facile à mettre en œuvre où l'ancre mobile traverse la zone le long du réseau en une dimension, comme le montre la Figure 4.2. L'ancre peut se déplacer tout au long de l'axe des Y ou bien l'axe des X et il peut couvrir et balayer toute la zone en une dimension.

La distance entre deux segments successifs de la trajectoire définit la résolution de la trajectoire. Si la portée de communication des capteurs est R , la résolution devrait être d'au plus $2 \times R$, pour s'assurer que tous les capteurs soient capable de recevoir des paquets de positions.

La rajectoire SCAN a l'avantage d'offrir une couverture uniforme de l'ensemble du réseau, et d'assurer que tous les nœuds reçoivent des paquets à partir de l'ancre mobile. L'inconvénient majeur de SCAN est la colinéarité des points. Lorsque la résolution est supérieure à la portée de transmission, de nombreux nœuds recevront des paquets à partir

des lignes sur le même segment, ce qui les empêchera d'obtenir une bonne estimation de position.

4.5.3 Trajectoire de Double Scan

Double Scan [95] une autre trajectoire simple qui est utilisée et proposée pour résoudre le problème de la colinéarité des points dans la trajectoire de Scan. La trajectoire de Double Scan permet de traverser la trajectoire de Scan dans les deux sens, comme le montre la Figure 4.3.

L'inconvénient du Double Scan est que la distance parcourue par l'ancre mobile est doublée, par rapport au simple Scan. Par conséquent, il consomme plus d'énergie dans le réseau.

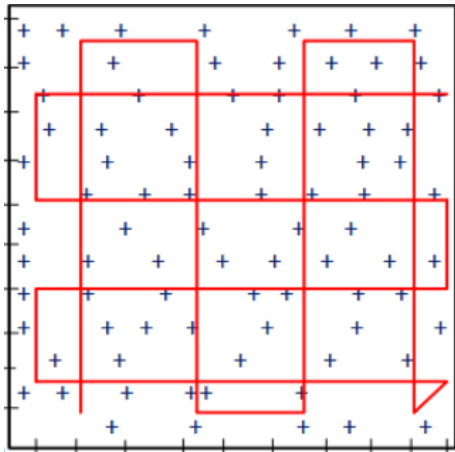


FIGURE 4.3 – Trajectoire de Double Scan

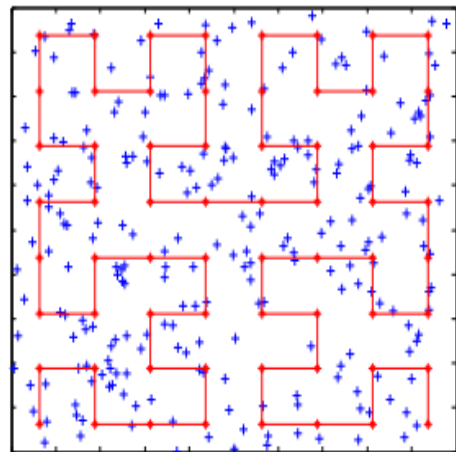


FIGURE 4.4 – Trajectoire de Hilbert

4.5.4 Trajectoire de Hilbert

Dans [96], la courbe de Hilbert a été proposée pour traiter à la fois le problème de la localisation et de la couverture, tandis que la motivation principale de l'utilisation de la courbe de Hilbert est de résoudre le problème de la colinéarité lié à la localisation [95], une telle courbe faisant plusieurs virages par rapport à Scan. Cela implique que si l'ancre mobile se déplace sur la courbe de Hilbert, les capteurs auront la possibilité de recevoir des paquets non colinéaires et d'obtenir une bonne estimation de leurs positions.

La Courbe de Hilbert (Voir la Figure 4.4) est une courbe fractale unidimensionnelle continue remplissant l'espace, qui visite tous les points dans un espace de 2 ou 3 dimensions, exactement une et une seule fois sans jamais se recouper. La courbe de base est

dite courbe d'ordre 1. Pour obtenir une courbe d'ordre i , chaque sommet de la courbe de base est remplacé par la courbe d'ordre $i-1$, avec une rotation et/ou réflexion appropriée pour s'adapter à la nouvelle courbe.

4.5.5 Trajectoire de Cercles

Puisque les trajectoires de l'ancre mobile basées sur une ligne droite introduisent le problème de la colinéarité, une trajectoire circulaire appelée Cercles est proposée dans [97]. La trajectoire de Cercles consiste en une séquence de cercles concentriques centrés dans la zone de déploiement (Voir la Figure 4.5). La résolution (R) est égale à la moitié du rayon du cercle le plus interne et augmente progressivement le rayon à chaque cercle extérieur.

Le principal avantage de la trajectoire en Cercles est que la colinéarité n'est pas introduite et chaque nœud capteur situé dans les cercles devient localisable. Le problème de la trajectoire de Cercles se pose quand la zone de déploiement est carrée, où la trajectoire ne peut pas couvrir les nœuds qui se trouvent dans les quatre coins. En plus, la trajectoire de Cercles a un problème de scalabilité quand la zone de déploiement est grande, les cercles deviennent plus grands. Cela réduit la précision de la localisation car la quantité de non-colinéarité diminue avec l'augmentation de la taille des cercles.

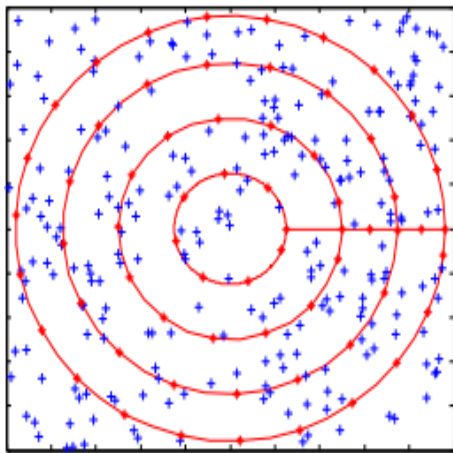


FIGURE 4.5 – Trajectoire de Cercles

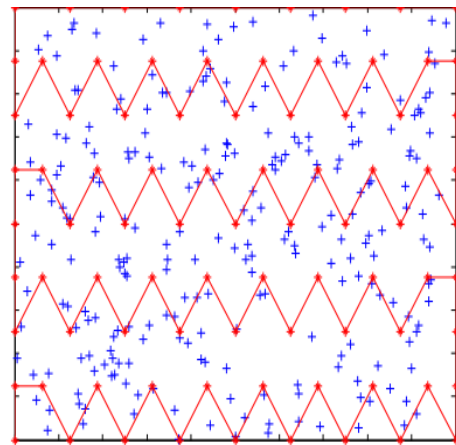


FIGURE 4.6 – Trajectoire de LMAT

4.5.6 Trajectoire de LMAT

L'idée d'utiliser des triangles équilatéraux a été initialement proposée dans [45] pour le déplacement des ancres afin de faciliter la localisation des capteurs. Dans [98, 99], la

trajectoire LMAT (Localization with a Mobile Anchor node based on Trilateration in Wireless Sensor Networks) a été proposée, dont l'objectif est de concevoir une trajectoire optimale de l'ancre mobile afin d'améliorer la précision de la localisation et d'assurer la couverture de la zone d'intérêt. Elle suppose que l'ancre mobile se déplace selon des triangles équilatéraux et transmet périodiquement les messages de ses positions (Voir la Figure 4.6).

Dans LMAT, un nœud inconnu est capable d'estimer ses coordonnées en utilisant la méthode de trilatération où la distance entre un capteur inconnu et l'ancre mobile est mesurée à l'aide de la puissance du signal reçu (RSSI).

L'inconvénient de LMAT est que l'énergie consommée dans le réseau est plus grande par rapport aux autres trajectoires. Cela est dû à la longueur de trajectoire qui est importante et qui nécessite en conséquence plusieurs messages envoyés par l'ancre mobile.

4.5.7 Synthèse

Afin de trouver la meilleure trajectoire traversée par l'ancre mobile qui aide à localiser tous ou la plupart des nœuds capteurs, plusieurs travaux ont été proposés afin de comparer toutes ces trajectoires. Par exemple dans [95], les auteurs ont comparé l'erreur de localisation et la longueur de trajectoire de trois techniques différentes, à savoir Scan, Double Scan et Hilbert. Les résultats montrent que la longueur de trajectoire de SCAN est la plus courte, mais de nombreux points colinéaires ne peuvent pas être utilisés dans la localisation. Tandis que Double Scan résout le problème de colinéarité des points, mais elle augmente la longueur de la trajectoire. Cependant, Hilbert a la meilleure performance de localisation car il utilise moins de points colinéaires.

Dans [100], les auteurs ont évalué la performance de cinq trajectoires, à savoir RWP, Scan, Hilbert, Circles et LMAT (Voir le Tableau 4.1). L'évaluation des performances montre que parmi ces trajectoires, le mouvement aléatoire (RWP) ne peut pas garantir la performance de la localisation ; LMAT offre les meilleures performances en matière de précision de localisation mais avec une longueur de trajectoire et une énergie importante. Cependant, Hilbert a une consommation d'énergie inférieure avec une précision de localisation presque égale à LMAT. En termes de temps requis pour la localisation, Cercles surpassent les autres trajectoires, mais avec une précision moindre.

TABLE 4.1 – Comparaison entre différentes trajectoires de l'ancre mobile

Trajectoire	Exactitude (m)	Succès (%)	Colinéarité	Énergie (μJ)	Temps (ms)	Longueur (m)
RWP [94]	1.27	79.6	40	7 680	202	1 512.3
Scan [95]	0.53	90	26	3 600	89.6	775
Hilbert [95, 96]	0.46	95.6	14	2 320	70.8	787.5
Cercles [97]	0.82	83.2	20	5 600	114	756
LMAT [98, 99]	0.43	98	16	2 960	77.6	1 045.41

Considérant toutes les évaluations et tous les résultats, il est donc essentiel et nécessaire de développer des nouvelles trajectoires pour la localisation à l'aide d'une ancre mobile afin d'améliorer le temps de localisation, la précision, la longueur de trajectoire et l'énergie consommée.

Dans la section suivante, nous détaillons la technique de localisation avec une ancre-Hilbert [96], son principe ainsi que les définitions et les hypothèses qui sont utilisées dans cet algorithme.

4.6 Localisation avec une ancre-Hilbert

4.6.1 Définitions

- **Ancre-Hilbert** : Une ancre-Hilbert est une ancre mobile qui se déplace en suivant la trajectoire de Hilbert avec la possibilité de régler l'ordre de la trajectoire.
- **Clefs de Hilbert** : Les clefs de Hilbert ou bien les h-clefs représentent les points où l'ancre mobile doit envoyer sa position, allant de 0 à $4^m - 1$. Où m désigne l'ordre de la courbe de Hilbert. La Figure 4.7 montre les clefs de Hilbert de l'ordre 2, allant de 0 à 15. Selon la représentation de la courbe, chaque h-clef correspond à un point de l'espace. Par exemple, pour la courbe d'ordre 2 la clef de Hilbert 6 correspond au point de l'espace $2D$ ayant comme coordonnées $(1, 3)$.

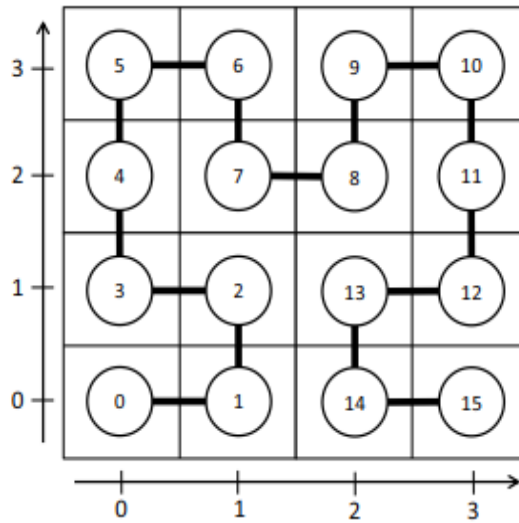


FIGURE 4.7 – Courbe de Hilbert d'ordre 2

- **Échelle de la grille s** : Nous définissons l'échelle s de la grille, comme étant la distance entre deux clefs de Hilbert consécutives.
- **Arête de la grille S** : Nous définissons l'arête S de la grille $S = s \times 2^m$ comme étant le côté du carré englobant la courbe de Hilbert.
- **Carré unité** : Le carré unité (Unit Square (US)) est un sous-carré de la grille globale, qui englobe quatre h-clefs consécutives formant la courbe de base de Hilbert. La première est toujours divisible par 4. Par exemple, dans la Figure 4.7 la courbe de Hilbert d'ordre 2 forme 4 US ($\{0, 1, 2, 3\}$, $\{4, 5, 6, 7\}$, $\{8, 9, 10, 11\}$, $\{12, 13, 14, 15\}$).
- **Ordre de la trajectoire de Hilbert** : Dans [96], les auteurs ont prouvé qu'un nœud n appartenant à un carré unité US , reçoit au moins trois des quatre paquets envoyés dans son US si et seulement si $s \leq \sqrt{2/5} \times R_c$ (Voir la Figure 4.8).

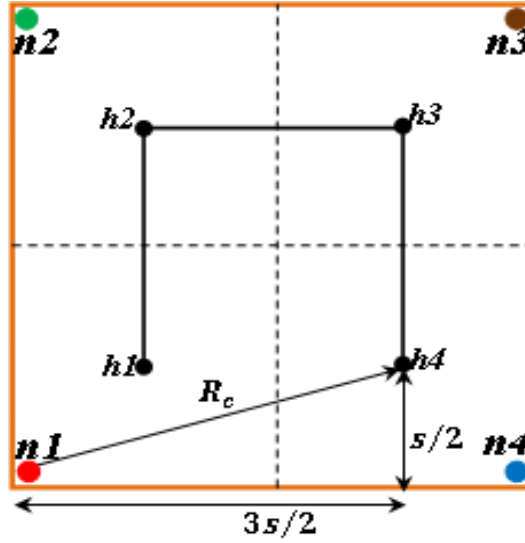


FIGURE 4.8 – Carré unité US

Où R_c représente la portée de communication de l'ancre mobile. Par conséquent, l'ordre de la courbe de Hilbert m est donné par :

$$m \geq \log_2 \left(\frac{\max(\text{longueur}, \text{largeur})}{\sqrt{2/5} \times R_c} \right)$$

Où, longueur et largeur représentent la longueur et la largeur de la région d'intérêt.

- **La longueur de la trajectoire de Hilbert (L_1) :** Une courbe de Hilbert d'ordre m divise l'espace de deux dimensions en 4^{m-1} US, et relie les centres de ces US en utilisant $4^{m-1} - 1$ segments de ligne, chacun de longueur égale à la longueur du côté d'un carré unité US qui est égale à s . Donc, $L_1 = ((3 \times 4^{m-1}) + (4^{m-1} - 1)) \times s$

$$L_1 = (4^m - 1) \times s \quad (4.1)$$

- **Le nombre d'ancres virtuelles (N_1) :** Le nombre d'ancres virtuelles est représenté par le nombre de points sur la trajectoire où l'ancre mobile a envoyé les paquets de sa position. Il y a 4^{m-1} US et dans chaque carré unité l'ancre mobile envoie quatre ancres virtuelles. Donc, le nombre total d'ancres virtuelles est donné par :

$$N_1 = 4 \times 4^{m-1} = 4^m \quad (4.2)$$

4.6.2 Principe de la localisation avec une ancre-Hilbert

Après le déploiement, l'ancre mobile parcourt la région d'intérêt suivant la trajectoire de Hilbert en émettant les h-clefs une fois qu'elle atteint leurs positions. Chaque nœud reçoit un certain nombre de h-clefs envoyées dans son voisinage et sélectionne trois qui correspondent aux h-clefs envoyées dans son carré unité US .

Le but de cette étape est d'avoir trois points référents non-colinéaires, à la fin de cette étape, chaque nœud du réseau aura ses trois références pour appliquer l'algorithme de détermination de positions.

Après que le nœud reçoit trois h-clefs, il doit estimer sa distance par rapport à la position envoyée par l'ancre mobile. Un nœud aura besoin de trois h-clefs seulement pour trouver sa position, donc il peut estimer seulement les trois distances correspondant à ses h-clefs choisies, ce qui permet d'optimiser la consommation d'énergie.

Quand un nœud reçoit les h-clefs et calcule les distances, il peut calculer sa position en utilisant la technique de trilatération.

La localisation à l'aide d'une ancre mobile présente de nombreux avantages en termes de coût réduit, de précision élevée et de faible consommation d'énergie. Les défis majeurs de ces approches consistent à trouver la trajectoire optimale des ancres mobiles et à déterminer les moments adéquats pour diffuser leurs paquets de position dans la zone de déploiement.

Dans la section suivante, nous présentons nos contributions (OHPL et OHPE), mais avant ça nous devons définir la zone de couverture Z utilisée dans notre travail [31].

4.7 Nos techniques d'optimisation de la trajectoire de Hilbert

4.7.1 La zone de couverture Z

Pour assurer la localisation de tous les nœuds inconnus, il faut que chaque nœud reçoive au moins trois messages (pour appliquer la technique de trilatération). L'idée de base de nos contributions est de définir une zone de couverture (Z) dans chaque carré unité (US) incluant la courbe de base de l'ordre 1 et permettant de localiser les nœuds les plus éloignés dans US . Par conséquent, tous les nœuds dans le même US peuvent être localisés.

Pour trouver la zone de couverture Z incluant la trajectoire de base d'une ancre, nous

considérons les nœuds $n1$, $n2$, $n3$ et $n4$ comme les plus éloignés de l'ancre mobile (Voir la Figure 4.9).

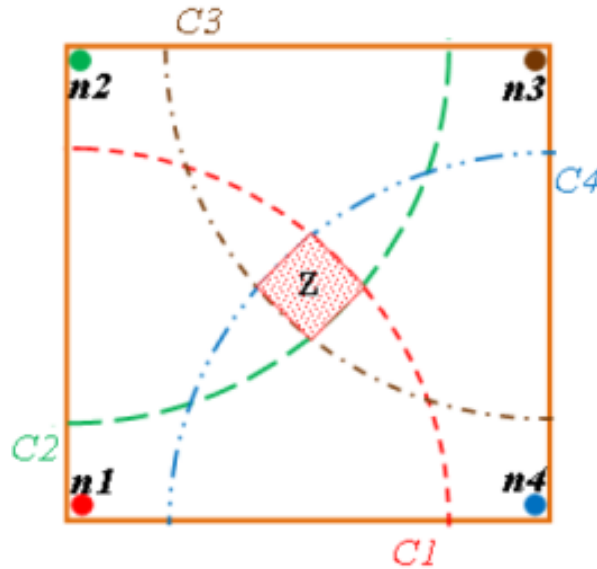


FIGURE 4.9 – La zone de couverture Z

La zone de couverture Z est obtenue par l'intersection des quatre portées de transmission $C1$, $C2$, $C3$ et $C4$ de $n1$, $n2$, $n3$ et $n4$. Les cercles $C1$, $C2$, $C3$ et $C4$ ayant comme centres $n1$, $n2$, $n3$, $n4$ respectivement et ont le même rayon $d(n1, h4)$ (Voir la Figure 4.10) :

$$d(n1, h4) = d(n1, C) = d(n2, D) = d(n3, A) = d(n4, B)$$

Dans la section suivante, nous allons présenter nos contributions de localisation à l'aide d'une ancre mobile [31]. Elles consistent à minimiser la longueur de la trajectoire de l'ancre mobile, à déterminer les positions des ancres virtuelles, à garantir que tous les nœuds puissent se localiser et à améliorer la précision des positions.

4.7.2 OHPL : Optimization of Hilbert Path Length

L'optimisation de la longueur de trajectoire peut être réalisée de deux manières :

- Maximiser la portée de transmission de l'ancre, ce qui permet de couvrir une grande surface. Mais, cette solution est coûteuse et épuise l'énergie des nœuds capteurs.
- Minimiser la longueur de la trajectoire de Hilbert dans chaque carré unité et cela peut réduire la longueur totale de la courbe de Hilbert et améliorer les performances.

Pour démontrer l'efficacité de notre contribution, nous devons définir notre trajectoire et prouver que sa longueur est plus courte que L_1 (équation 4.1). De plus, nous devons également montrer que le nombre d'ancres virtuelles reste le même comme dans Hilbert.

4.7.2.1 Trajectoire de l'ancre mobile

En utilisant le concept de la zone de couverture définie précédemment, il est évident que notre courbe appartenant à la zone de couverture Z (Voir la Figure 4.10) est plus petite que la courbe de Hilbert de base.

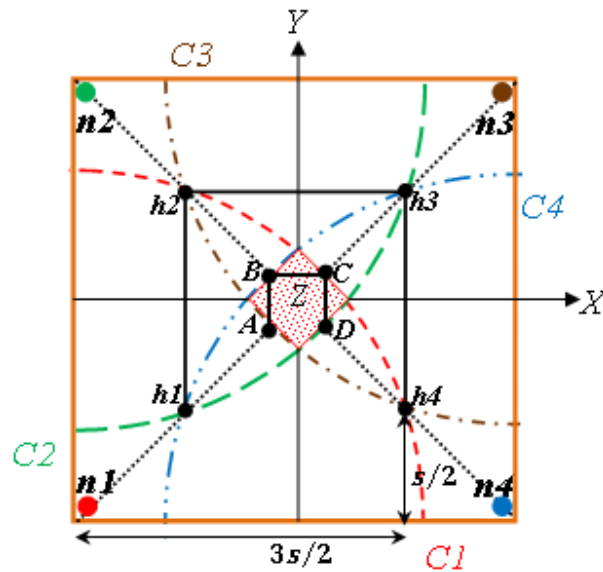


FIGURE 4.10 – Notre trajectoire ABCD de l'ancre dans un carré unitaire

Nous proposons donc de remplacer le carré $h1h2h3h4$ de la courbe de Hilbert par un plus petit quadrilatère $ABCD$. Les quatre sommets A , B , C et D de notre quadrilatère appartiennent au périmètre de la zone de couverture Z . Où,

- La position de A est obtenue par l'intersection de cercle $C3$ et le segment de droite $[n1, n3]$ ($A=C3 \cap [n1, n3]$);
- La position de B est obtenue par l'intersection de cercle $C4$ et le segment de droite $[n2, n4]$ ($B=C4 \cap [n2, n4]$);
- La position de C est obtenue par l'intersection de cercle $C1$ et le segment de droite $[n1, n3]$ ($C=C1 \cap [n1, n3]$);

- La position de D est obtenue par l'intersection de cercle $C2$ et le segment de droite $[n2, n4]$ ($D=C2 \cap [n2, n4]$).

Lemme 1 : Un nœud n appartenant à un carré unité US , reçoit au moins quatre paquets envoyés par l'ancre mobile dans son US si et seulement si $s \leq \sqrt{2/5} \times R_c$, où R_c est la portée de communication de l'ancre mobile.

Preuve : Si chaque nœud de $n1, n2, n3$ et $n4$ (l'ensemble des nœuds les plus éloignés), reçoit au moins quatre paquets, donc chaque nœud à l'intérieur de carré unité reçoit au moins quatre paquets. En outre, le nœud $n1$ reçoit quatre paquets dans son US si et seulement si la distance entre lui et C , $d(n1, C)$ est inférieure ou égale à R_c ($d(n1, C) \leq R_c$). Pour prouver le lemme 1, nous définissons et prouvons les deux propriétés suivantes :

Propriété 1 : Le nœud $n1$ reçoit au moins quatre paquets dans son $US \Rightarrow s \leq \sqrt{2/5} * R_c$.

Preuve : Le nœud $n1$ reçoit au moins quatre paquets dans son US si et seulement si le nœud $n1$ reçoit le paquet de l'ancre mobile au point C .

$$\Rightarrow d(n1, C) \leq R_c$$

En appliquant le théorème de Pythagore, nous obtenons :

$$\begin{aligned} d(n1, C)^2 &= d(n1, h4)^2 = \left(\frac{s}{2}\right)^2 + \left(\frac{3s}{2}\right)^2 \\ \Rightarrow s &= \sqrt{2/5} * d(n1, C) \\ \Rightarrow s &\leq \sqrt{2/5} * R_c \end{aligned}$$

Donc, $s \leq \sqrt{2/5} * R_c$ est vérifiée.

Propriété 2 : $s \leq \sqrt{2/5} * R_c \Rightarrow$ Le nœud $n1$ reçoit au moins quatre paquets dans son US .

Preuve : Nous avons, $s = \sqrt{2/5} * d(n1, C)$ et $s \leq \sqrt{2/5} * R_c$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \sqrt{2/5} * d(n1, C) &\leq \sqrt{2/5} * R_c \\ \Rightarrow d(n1, C) &\leq R_c \end{aligned}$$

Nous avons $d(n1, C) \leq R_c$, par conséquent, le nœud $n1$ reçoit le paquet de l'ancre mobile à la position C et reçoit au moins quatre paquets dans son US .

Lemme 2 : Si les positions de A, B, C et D sont obtenues par les équations : $A=C3 \cap [n1, n3]$, $B=C4 \cap [n2, n4]$, $C=C1 \cap [n1, n3]$ et $D=C2 \cap [n2, n4]$, alors, le quadrilatère $ABCD$ est un carré.

Preuve : Pour montrer que notre quadrilatère $ABCD$ est un carré il suffit de calculer

les coordonnées des positions A , B , C et D sur les axes X et Y (voir la figure 4.10), et de prouver que leurs coordonnées sont respectivement $(-x, -x)$, $(-x, x)$, (x, x) et $(x, -x)$.

Les coordonnées des points A, B, C et D peuvent être obtenues en utilisant les équations suivantes :

Nous avons,

$$\begin{cases} C3 : (x - s)^2 + (y - s)^2 = d(n1, h4)^2 = \frac{5}{2}s^2 \\ [n1, n3] : y = x \text{ et } x < 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} C4 : (x - s)^2 + (y + s)^2 = d(n1, h4)^2 = \frac{5}{2}s^2 \\ [n2, n4] : y = -x \text{ et } x < 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} C1 : (x + s)^2 + (y + s)^2 = d(n1, h4)^2 = \frac{5}{2}s^2 \\ [n1, n3] : y = x \text{ et } x > 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} C2 : (x + s)^2 + (y - s)^2 = d(n1, h4)^2 = \frac{5}{2}s^2 \\ [n2, n4] : y = -x \text{ et } x > 0 \end{cases}$$

Alors, les coordonnées de A , B , C et D sont

$$\begin{aligned} A & \left(-\left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1\right) * s, -\left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1\right) * s \right), \\ B & \left(-\left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1\right) * s, \left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1\right) * s \right), \\ C & \left(\left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1\right) * s, \left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1\right) * s \right) \text{ et} \\ D & \left(\left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1\right) * s, -\left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1\right) * s \right) \end{aligned}$$

Par conséquent, le quadrilatère $ABCD$ est un carré où les coordonnées sont $A(-x, -x)$, $B(-x, x)$, $C(x, x)$, et $D(x, -x)$.

La longueur du côté de ce carré est égale à $2 * x$.

Où, $x = \left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1\right) * s$

4.7.2.2 Longueur de trajectoire (L_2)

Puisque dans notre approche, nous ne réduisons que la taille du carré, donc notre courbe l'ordre m divise l'espace de deux dimensions en 4^{m-1} US . Dans chaque carré unité, il y a

trois segments de ligne. Chaque segment de ligne a une longueur de $2 * x$. Pour connecter ces US ($4^{m-1} - 1$) segments de ligne sont utilisés, chaque segment a une longueur égal à $2 * (s - x)$. (Voir la Figure 4.10). Donc, la longueur totale de la trajectoire L_2 peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$L_2 = (6 * x * 4^{m-1}) + (4^{m-1} - 1) * 2(s - x) \quad (4.3)$$

Où, $x = \left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1\right) * s$

4.7.2.3 Efficacité de trajectoire

Pour montrer l'efficacité de notre approche, il est nécessaire de prouver que la longueur de notre trajectoire (L_2) est plus courte que la courbe de Hilbert (L_1).

$$\begin{aligned} L_2 - L_1 &= 3 * 2 * \left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1\right) * s * 4^{m-1} + 2 * s * (4^{m-1} - 1) \\ &- 2\left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1\right) * s * (4^{m-1} - 1) - (3 * 4^{m-1} * s) - (4^{m-1} - 1) * s \\ &= 3 * s * 4^{m-1} * (\sqrt{5} - 3) + s * (4^{m-1} - 1)(3 - \sqrt{5}) \\ &= (\sqrt{5} - 3) * s * (2 * 4^{m-1} + 1) \end{aligned}$$

$\forall m \geq 1$ on a :

$$\begin{aligned} (s * (2 * 4^{m-1} + 1) > 0 \text{ et } (\sqrt{5} - 3) < 0) \\ \Rightarrow (\sqrt{5} - 3) * s * (2 * 4^{m-1} + 1) < 0 \\ \Rightarrow L_2 - L_1 < 0 \Rightarrow \forall m \geq 1, L_2 < L_1 \end{aligned}$$

Donc, notre trajectoire est plus courte que celle de Hilbert.

4.7.2.4 Nombre d'ancres virtuelles (N_2)

Le nombre d'ancres virtuelles est égal au nombre de h-clef. Ce dernier est lié au nombre des US ($(4^{m-1}US)$). Comme nous avons le même nombre de h- clef avec la technique de Hilbert, le nombre d'ancres virtuelles reste le même (dans chaque carré unité, l'ancre mobile envoie quatre messages). Donc, le nombre total d'ancres virtuelles est donné par :

$$N_2 = N_1 = 4^m \quad (4.4)$$

4.7.3 OHPE : Optimization of Hilbert Path Energy

Dans la première contribution, nous avons réussi à réduire la longueur de la trajectoire. Dans la deuxième contribution, nous essayons de réduire la consommation d'énergie tout en assurant la couverture de tous les capteurs. Par conséquent, nous essayons de minimiser à la fois le nombre d'ancres virtuelles (nombre de messages envoyés) et la longueur de trajectoire traversée par l'ancre mobile. Cela peut également accélérer la phase de localisation et économiser l'énergie de l'ancre mobile ainsi que des nœuds capteurs.

4.7.3.1 Trajectoire de l'ancre mobile

En appliquant la technique de la trilatération, un nœud pour calculer sa position n'a besoin que de trois positions non colinéaires au lieu de quatre. Par conséquent, nous pouvons utiliser dans chaque US un triangle au lieu d'un carré. Le plus simple est de choisir un triangle isocèle appartenant à la zone de couverture Z . Dans ce cas, on choisit le triangle $A'B'C'$, où leurs sommets appartiennent au périmètre de Z (voir la figure 4.11).

Lemme 3 : Un nœud n appartenant à un carré unité US , reçoit au moins trois paquets

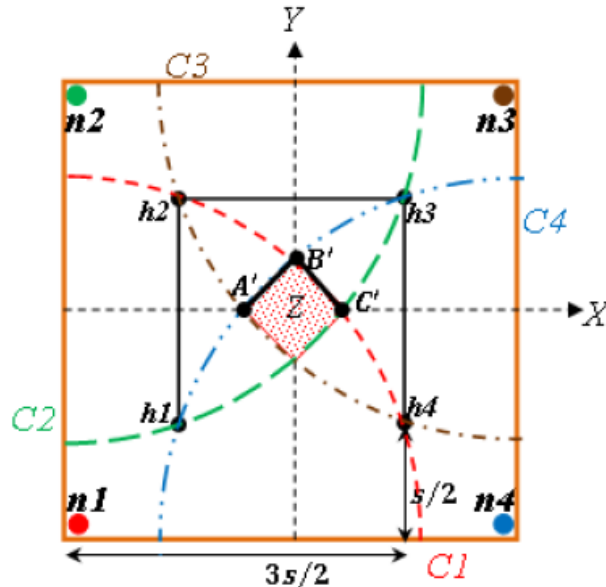


FIGURE 4.11 – Notre trajectoire $A'B'C'$ dans un carré unité

envoyés par l'ancre mobile dans son US si et seulement si $s \leq \sqrt{2/5} \times R_c$.

Preuve : La preuve du lemme 3 est la même que le lemme 1 ; nous remplaçons seulement $d(n1, C)$ par $d(n1, C')$ et nous appliquons le théorème de Pythagore (Parce que $d(n1, C) = d(n1, C') = d(n1, h4)$).

Lemme 4 : Si les positions de A' , B' et C' sont respectivement obtenues par les équations $A' = C3 \cap (Axe \ X)$, $B' = C1 \cap (Axe \ Y)$ et $C' = C2 \cap (Axe \ X)$, alors, le triangle $A'B'C'$ est un triangle isocèle. **Preuve :** Pour prouver que le triangle $A'B'C'$ est isocèle en B' , nous devons démontrer que $A'B' = B'C'$.

Pour calculer les distances $A'B'$ et $B'C'$, on commence par déterminer les coordonnées des points A' , B' et C' .

Les coordonnées du point A' sont obtenues comme suit :

$$A' = C3 \cap (Axe \ X)$$

$$\begin{cases} C3 : (x - s)^2 + (y - s)^2 = d(n1, h4)^2 = \frac{5}{2}s^2 \\ X : (y) = 0 \text{ et } x < 0 \end{cases} \\ \Rightarrow A' \left(- \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right) * s, 0 \right)$$

De la même manière, les coordonnées du point B' sont déterminées :

$$B' = C1 \cap (Axe \ Y)$$

$$\begin{cases} C1 : (x + s)^2 + (y + s)^2 = d(n1, h4)^2 = \frac{5}{2}s^2 \\ Y : (x) = 0 \text{ et } y > 0 \end{cases} \\ \Rightarrow B' \left(0, \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right) * s \right)$$

Et les coordonnées du point C' sont calculées par :

$$C' = C2 \cap (Axe \ X)$$

$$\begin{cases} C2 : (x + s)^2 + (y - s)^2 = d(n1, h4)^2 = \frac{5}{2}s^2 \\ X : (y) = 0 \text{ et } x > 0 \end{cases} \\ \Rightarrow C' \left(\left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right) * s, 0 \right)$$

Ainsi, les distances de $A'B'$ et $B'C'$ sont données par :

$$A'B'^2 = 2 * \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right)^2 * s^2 \Rightarrow A'B' = (\sqrt{3} - \sqrt{2}) * s$$

$$B'C'^2 = 2 * \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right)^2 * s^2 \Rightarrow B'C' = (\sqrt{3} - \sqrt{2}) * s$$

$$\Rightarrow A'B' = B'C'$$

\Rightarrow Le triangle $A'B'C'$ est un triangle isocèle dans B' .

Où, $A'B' = B'C' = (\sqrt{3} - \sqrt{2}) * s$. et $A'C' = 2 * \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right) * s$.

4.7.3.2 Longueur de trajectoire (L_3)

La nouvelle trajectoire d'ordre m divise l'espace de deux dimensions en 4^{m-1} US (dans chaque carré unité, il y a deux segments de ligne de longueur $(\sqrt{3} - \sqrt{2}) * s$) et relie ces US en utilisant $(4^{m-1} - 1)$ segments de ligne, avec une longueur pour chacun égale à : $A'C' = 2 * \left(s - \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right) \right)$.

Alors,

$$L_3 = (2 * (\sqrt{3} - \sqrt{2}) * s * 4^{m-1}) + (4^{m-1} - 1) * 2 \left(s - \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right) \right) \quad (4.5)$$

4.7.3.3 Efficacité de trajectoire

Il est nécessaire de prouver que la trajectoire de l'approche 2 (L_3) est plus courte que la trajectoire d'approche 1 (L_2) : Il est évident que,

$$2 * (\sqrt{3} - \sqrt{2}) < 6 * \left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1 \right)$$

$$\Rightarrow (2 * (\sqrt{3} - \sqrt{2}) * s * 4^{m-1}) < 6 * \left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1 \right) * s * 4^{m-1} \quad (4.6)$$

On a aussi,

$$\left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right) > \left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1 \right)$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow s - \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right) < s - \left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1 \right) \\ \Rightarrow (4^{m-1} - 1) * 2 \left(s - \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right) \right) &< (4^{m-1} - 1) * 2 \left(s - \left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1 \right) \right) \end{aligned} \quad (4.7)$$

En additionnant les équations 4.6 et 4.7, on obtient

$$\begin{aligned} &\Rightarrow (2 * (\sqrt{3} - \sqrt{2}) * s * 4^{m-1}) + (4^{m-1} - 1) * 2 \left(s - \left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1 \right) \right) \\ &< \left(6 * \left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1 \right) * s * 4^{m-1} \right) + (4^{m-1} - 1) * 2 \left(s - \left(\sqrt{\frac{5}{4}} - 1 \right) \right) \end{aligned}$$

Alors,

$$\Rightarrow \forall m \geq 1, L_3 < L_2$$

4.7.3.4 Nombre d'ancres virtuelles (N_3)

Dans cette contribution (OHPE), puisque nous avons réduit le nombre d'ancres virtuelles dans chaque US , il est évident que le nombre d'ancres virtuelles total (N_3) est inférieur à la première approche (N_2). On a 4^{m-1} US et dans chaque carré unité, l'ancre mobile envoie trois messages. Alors, le nombre d'ancres virtuelles total est donné par :

$$N_3 = 3 * 4^{m-1} \quad (4.8)$$

Par conséquent, $\forall m \geq 1, (3 * 4^{m-1} < 4 * 4^{m-1})$

$$\Rightarrow \forall m \geq 1, N_3 < N_2$$

4.8 Simulation et analyses

Pour évaluer les performances de nos deux trajectoires proposées, nous avons choisi de les implémenter avec la trajectoire de Hilbert en utilisant le simulateur Cooja dans Instant Contiki 2.7. Nous avons comparé ces trois trajectoires en fonction de : la longueur de la trajectoire, le nombre d'ancres virtuelles, le nombre de messages reçus, la consommation d'énergie, l'erreur de localisation et le taux de réussite (pourcentage des capteurs localisés). Le Tableau 4.2 résume les principaux paramètres de simulation utilisés :

TABLE 4.2 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeur
Modèle de propagation radio	Unit Disk Graph Medium UDGM : Distance Loss Multi-path Ray-tracer Medium (MRM)
Type de Mote	Sky Mote
Nombre d'ancres mobiles	1
Ordre de trajectoire	2
Taille du réseau (mXm)	80X80
Nombre d'obstacles	[1, 9]
Nombre de capteurs	[10, 60]
Portée de transmission (m)	[20, 40]

4.8.1 Longueur de trajectoire et nombre d'ancres virtuelles

Dans cette partie, nous comparons nos deux propositions avec la trajectoire de Hilbert en termes de longueur de trajectoire et de nombre d'ancres virtuelles.

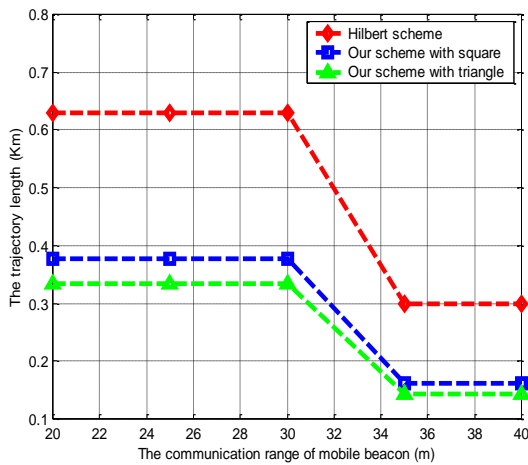


FIGURE 4.12 – Longueur de trajectoire

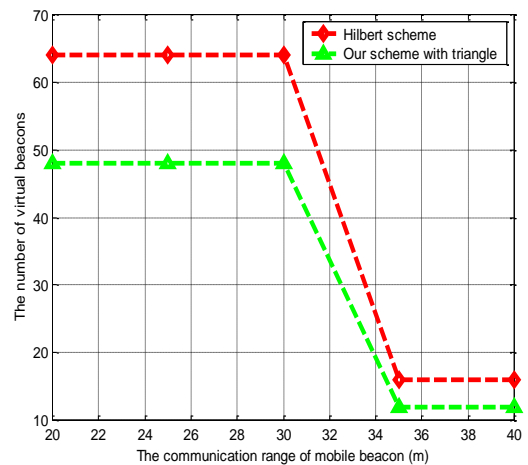


FIGURE 4.13 – Nombre d'ancre virtuelle

En variant la portée de communication, les figures 4.12 et 4.13 représentent une comparaison entre nos trajectoires et celle de Hilbert en termes de longueur de trajectoire et de nombre d'ancres virtuelles.

La figure 4.12 montre que la longueur de trajectoire de notre technique avec carré (OHPL) est plus courte que celle de Hilbert. Elle montre aussi que notre trajectoire avec triangle (OHPE) surpasse les autres en terme de longueur. Où elle n'a pas dépassé 630m

pour Hilbert, 378m pour notre trajectoire avec carré et 350m pour notre trajectoire avec triangle.

D'autre part, la figure 4.13 compare le nombre d'ancres virtuelles seulement entre notre trajectoire avec triangle et Hilbert parce que notre trajectoire avec carré a le même nombre d'ancres virtuelles que Hilbert. Cette figure prouve que pour chaque valeur de R_c , le nombre d'ancres virtuelles nécessaire dans notre trajectoire avec triangle est inférieur à celui de Hilbert, où il n'a pas dépassé 64 pour Hilbert et 48 pour notre trajectoire avec triangle.

4.8.2 Nombre de messages reçus

Le nombre de messages reçus en moyenne est un autre indicateur de performance dont nous discutons dans cette section. Dans les figures 4.14 et 4.15, nous comparons le nombre de messages reçus entre Hilbert et nos contributions en faisant varier la portée de communication et le nombre de nœuds. A partir des figures 4.14 et 4.15, nous pouvons voir que notre contribution avec triangle (OHPE) offre de meilleures performances que notre contribution avec carré (OHPL) et Hilbert. En effet, le nombre d'ancres virtuelles dans notre trajectoire avec triangle est inférieur à celui des deux autres schémas (l'ancre mobile n'envoie que trois messages dans chaque carré unité).

Cependant, dans notre trajectoire avec carré, le nombre de messages reçus est plus grand que Hilbert car dans notre méthode avec carré chaque nœud reçoit au moins quatre messages.

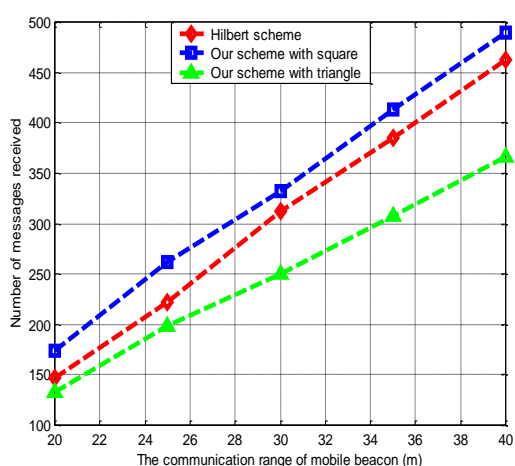


FIGURE 4.14 – Nombre de messages reçus en fonction de la portée de transmission

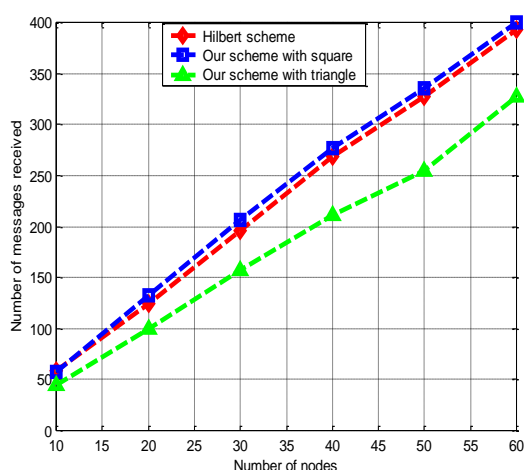


FIGURE 4.15 – Nombre de messages reçus en fonction de nombre de nœuds

4.8.3 Énergie consommée

La consommation d'énergie est parmi les principaux facteurs affectant les différentes applications et systèmes des réseaux de capteurs. Dans cette section, nous montrons les performances énergétiques obtenues de nos propositions par rapport à la trajectoire de Hilbert.

Dans un premier temps, nous comparons la consommation d'énergie dans chaque méthode pour différentes valeurs de portée de communication, puis, pour différentes densités de nœuds.

Dans la figure 4.16, nous remarquons que la consommation d'énergie augmente avec l'augmentation de la portée de communication. Parce que chaque nœud consomme plus d'énergie puisqu'il reçoit un plus grand nombre de messages.

D'autre part, la figure 4.17 montre que l'augmentation du nombre de nœuds n'a pas un impact important sur la consommation d'énergie (par exemple, la consommation d'énergie n'a pas dépassé 7% pour le système Hilbert et 5.5% pour notre trajectoire avec carré et avec triangle).

Les figures 4.16 et 4.17 montrent aussi que notre contribution avec triangle (OHPE) consomme moins d'énergie par rapport aux deux autres trajectoires car les seuls messages reçus par les nœuds sont les messages envoyés par l'ancre mobile (nombre d'ancres virtuelles). La valeur de ce dernier est plus élevée dans Hilbert et aussi dans notre trajectoire avec carré. Par conséquent, ils consomment plus d'énergie.

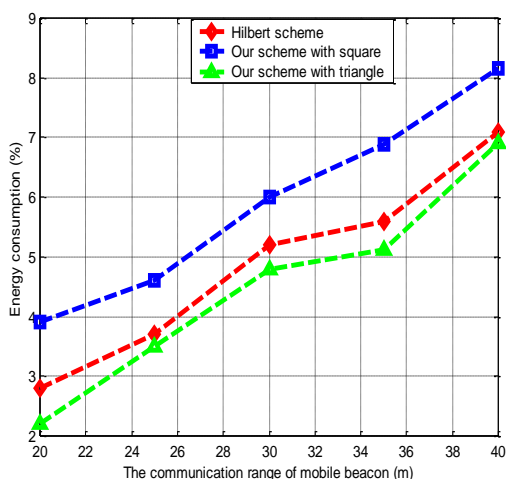


FIGURE 4.16 – Énergie consommée en fonction de la portée de transmission

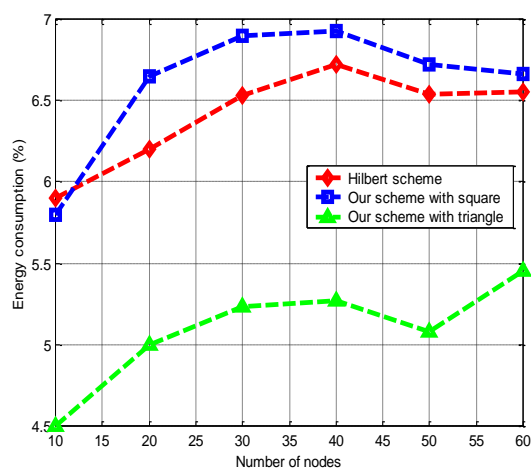


FIGURE 4.17 – Énergie consommée en fonction de nombre de nœuds

Les résultats montrent que notre trajectoire avec triangle (OHPE) est significativement efficace en termes de longueur de trajectoire, de nombre d'ancre virtuelle et de consommation d'énergie.

4.8.4 Erreur de localisation

L'erreur de localisation est également parmi les principales mesures d'évaluation des performances dans les réseaux de capteurs sans fil. La précision de la localisation est fortement influencée par l'estimation de la distance. L'inexactitude de la distance estimée augmente l'erreur de localisation des nœuds. Cette erreur est généralement calculée comme suit :

$$\text{Erreur de localisation} = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2}$$

Où, (x, y) et (\hat{x}, \hat{y}) sont la position réelle et estimée du nœud.

Dans les figures 4.18 et 4.19, nous comparons l'erreur de localisation entre Hilbert et nos contributions pour différentes portées de communication et différentes densités.

Les courbes montrent que notre trajectoire proposée avec carré (OHPL) réduit l'erreur de localisation par rapport aux autres trajectoires car dans notre technique avec carré, le chemin de l'ancre mobile est plus proche des différents nœuds.

La figure 4.18 montre également que l'erreur de localisation augmente avec l'augmentation de la portée de transmission. Ceci est dû principalement au fait que lorsque la portée de transmission augmente, la distance entre l'ancre mobile et les autres nœuds augmente aussi. Ceci, génère des erreurs de localisation plus élevées.

La figure 4.19 montre que la densité des nœuds affecte aussi la précision de localisation où, notre proposition avec carré surpasse toujours les autres approches. Par exemple, lorsque la densité des nœuds augmente, l'erreur de localisation est d'environ 1.8m dans Hilbert, 1.6m dans notre trajectoire avec triangle (OHPE) et seulement 1.5m dans notre trajectoire avec carré (OHPL).

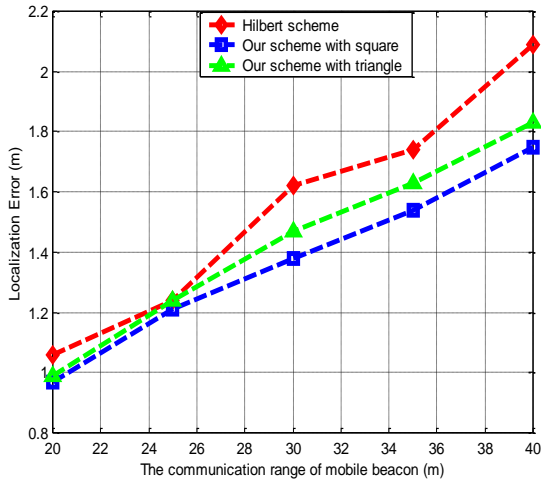


FIGURE 4.18 – Erreur de localisation en fonction de la portée de transmission

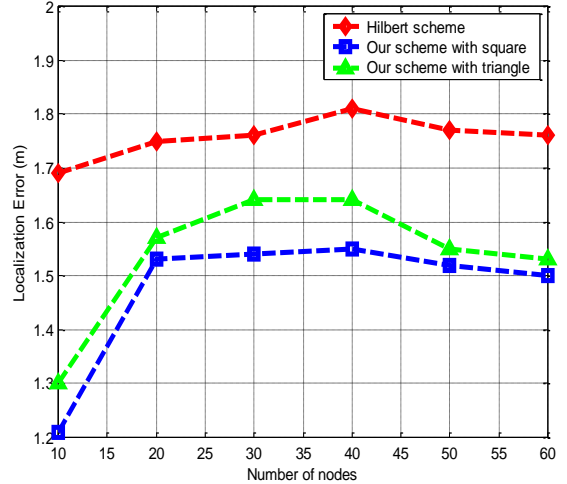


FIGURE 4.19 – Erreur de localisation en fonction de nombre de nœuds

4.8.5 Taux de réussite de localisation

Le dernier paramètre étudié est le taux de réussite de la localisation qui est calculé comme suit :

$$Taux = \frac{N_l}{N_t}$$

Où,

- N_l : Nombre de nœuds localisés.
- N_t : Nombre de nœud total.

En utilisant la même stratégie, nous comparons le taux de réussite entre Hilbert et nos contributions pour différentes portée de communication et différentes densité.

D'après la figure 4.20, nous observons qu'avec l'augmentation de la portée de transmission, le taux de réussite augmente également en raison de l'augmentation du nombre de messages reçus par chaque nœud.

Nous remarquons également que pour toutes les valeurs de la portée de transmission et de la densité, notre trajectoire avec carré (OHPL) est plus efficace car, les nœuds reçoivent plus de messages et peuvent donc calculer leurs positions. Par exemple, si $R_c = 25m$, le taux de réussite de la localisation est égal à 75% pour Hilbert, 98.33% pour notre trajectoire avec carré (OHPL) et 91.66% pour notre trajectoire avec triangle (OHPE).

Nous remarquons aussi que pour une valeur de portée de transmission supérieure ou égale à $30m$, tous les nœuds ont pu calculer leurs positions et cela pour les trois trajectoires (taux de réussite = 100%).

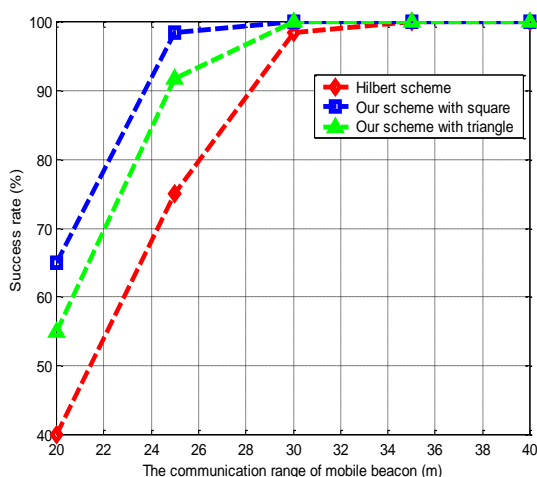


FIGURE 4.20 – Taux de réussite en fonction de la portée de transmission

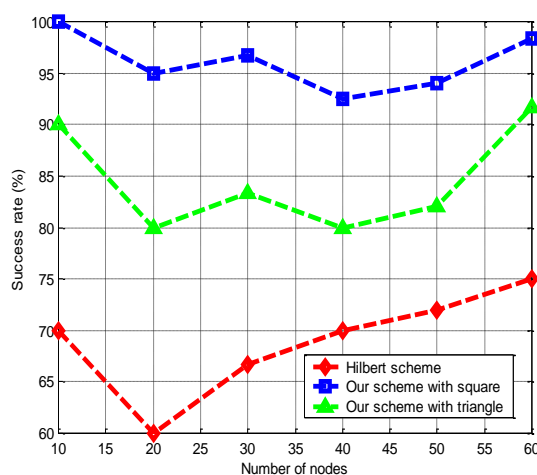


FIGURE 4.21 – Taux de réussite en fonction de nombre de nœuds

La figure 4.21 montre que la densité des nœuds influe faiblement sur le taux de réussite. Nous observons aussi que notre trajectoire avec carré surpasse les deux autres trajectoires et cela pour toutes les valeurs de densité. Par exemple, le taux de réussite avec Hilbert peut atteindre jusqu'à 75%, 93% avec notre trajectoire avec triangle et jusqu'à 100% avec notre trajectoire avec carré.

4.8.6 Environnement multi-trajets

Dans toutes les simulations précédentes, nous avons utilisé le modèle de propagation radio UDGM (Unit Disk Graph Medium), où la portée de transmission est un disque idéal dans lequel les nœuds capteurs ne reçoivent pas de paquets si ils sont hors de ce disque alors qu'ils reçoivent tous les paquets (avec un taux de livraison des messages = 100%) si ils sont dans le disque ce qui n'est pas réaliste.

Afin d'étudier les performances de nos techniques en utilisant un modèle de propagation radio réaliste, nous choisissons le modèle de propagation radio Multi-Path Ray-tracer Medium (MRM) qui supporte l'utilisation d'obstacles.

Pour montrer l'impact de l'utilisation d'une portée de fréquences radio non parfaite,

nous avons calculé le taux de réussite et l'erreur de la localisation des trois méthodes en faisant varier le nombre d'obstacles de 1 à 9 et en utilisant une portée de communication fixe ($R_c = 25m$) pour toutes les simulations.

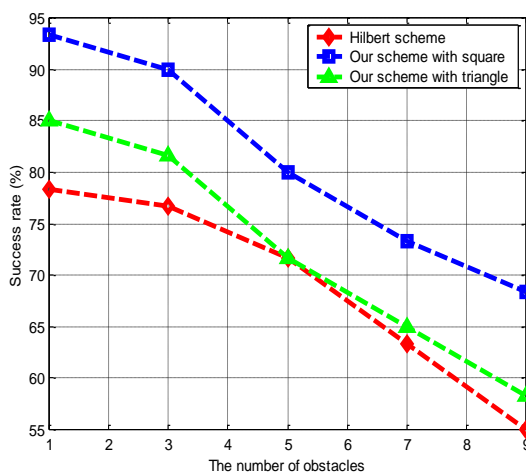


FIGURE 4.22 – Taux de réussite de localisation dans différents environnements

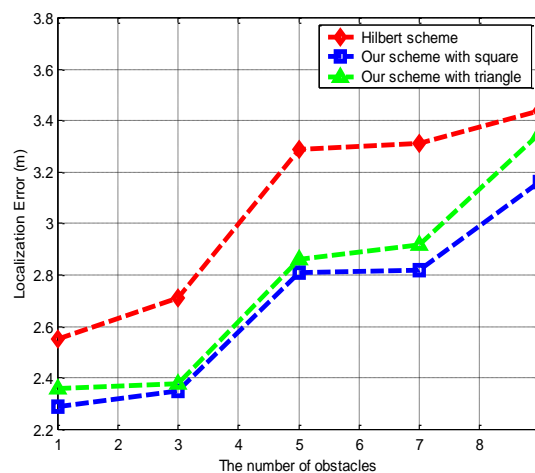


FIGURE 4.23 – Erreur de localisation dans différents environnements

La figure 4.22 montre que le taux de réussite de la localisation diminue avec l'augmentation du nombre d'obstacles. Cela peut s'expliquer par le fait que dans un environnement multi- trajets, le taux de livraison de paquets diminue et certains nœuds ne peuvent pas recevoir le nombre de messages nécessaire pour calculer leurs positions. Pour cette raison, notre trajectoire avec carré (OHPL) surpasse les deux autres trajectoires. Par exemple, dans un scénario avec 7 obstacles, le taux de réussite obtenu en utilisant la trajectoire avec carré (OHPL) est de 73.33%, ce qui surpasse largement celui obtenu par Hilbert (55%).

D'après la figure 4.23, nous observons qu'avec l'augmentation du nombre d'obstacles, l'erreur de localisation augmente aussi et cela pour les différents scénarios. Ceci est dû à l'augmentation de la distance entre l'ancre mobile et les autres nœuds provoquée par le multi-trajet.

Nous remarquons également que notre trajectoire avec carré minimise l'erreur de localisation par rapport aux autres trajectoires. Par exemple, si le nombre d'obstacles est égal à 7, l'erreur de la localisation est égale à 3.31m pour Hilbert, 2.82m pour notre trajectoire avec carré (OHPL) et 2.92m pour notre trajectoire avec triangle (OHPL).

D'après ces résultats, nous pouvons conclure que même dans les environnements multi-trajet, notre trajectoire avec carré (OHPL) surpasse clairement les deux autres trajectoires en termes d'erreur de localisation et de taux de réussite de localisation.

4.9 Conclusion

De nombreuses applications et protocoles dans les réseaux de capteurs sans fil sont basés sur la localisation. Par conséquent, il est nécessaire de déterminer la position des nœuds capteurs même après leur déploiement. Des techniques de localisation utilisant une ancre mobile ont été proposées dans ce contexte, pour localiser des nœuds capteurs inconnus. Cependant, pour économiser l'énergie des nœuds, il est nécessaire d'envoyer un nombre optimal de messages. Ainsi, une trajectoire optimale de l'ancre mobile permet d'atteindre un tel objectif.

Dans ce chapitre, nous avons proposé deux trajectoires optimales pour la localisation des capteurs à l'aide d'une ancre mobile (OHPL et OHPE). L'analyse analytique et les résultats de la simulation montrent que notre trajectoire avec triangle (OHPE) permet de réduire la longueur de la trajectoire, ce qui peut accélérer la phase de la localisation et de réduire aussi le nombre d'ancres virtuelles et par conséquent économiser la consommation d'énergie.

D'autre part, notre trajectoire avec carré (OHPL) permet de réduire la longueur de la trajectoire de l'ancre mobile et de réduire la distance entre l'ancre mobile et les nœuds capteurs, et par conséquent améliorer la précision de la localisation. Elle permet aussi d'augmenter le taux de réussite de localisation des nœuds capteurs.

Le chapitre suivant sera consacré aux techniques de correction des positions des nœuds dans un réseau fortement mobile tel que VANET.

Correction des positions des nœuds dans un réseau fortement mobile

Sommaire

5.1	Introduction	93
5.2	Importance de la localisation dans les réseaux VANET	93
5.3	Techniques de correction des positions des nœuds dans les réseaux VANET	95
5.3.1	Méthodes d'estimation	96
5.3.2	Méthodes intelligentes	97
5.3.3	Méthodes hybrides	98
5.4	RISC : Reduced Integration Scheme Complexity	99
5.4.1	Phase de revue et d'évaluation	100
5.4.1.1	Unité de fusion GPS/INS	100
5.4.1.2	Unité de détection de multi-trajets (MDU)	102
5.4.1.3	Unité de correction de la localisation (LEU)	102
5.4.2	Phase d'apprentissage	102
5.4.3	Phase de correction	103
5.5	Étude de complexité temporelle	104

CHAPITRE 5. CORRECTION DES POSITIONS DES NŒUDS MOBILES

5.5.1	La complexité temporelle de IVCAL	104
5.5.2	La complexité temporelle de notre approche RISC	105
5.6	Simulation et analyses	105
5.7	Conclusion	110

5.1 Introduction

Les communications entre les véhicules constituent un réseau Ad hoc de véhicules (VANET). Contrairement à MANET, dans un VANET, les nœuds qui sont des véhicules peuvent se déplacer avec une vitesse élevée et généralement doivent communiquer rapidement et sûrement.

Plusieurs informations peuvent être échangées entre les véhicules, par exemple quand un accident se produit dans une route, des messages d’alerte doivent être diffusés pour informer tous les autres véhicules. Localiser un véhicule en panne (ou un véhicule en danger) ou localiser les véhicules dans le voisinage est très important pour la sécurité des usagers de la route.

Dans ce chapitre, nous présentons le problème de la localisation dans les réseaux VANET. Pour cela, nous montrons les nécessités de la localisation et nous examinons plusieurs techniques et solutions proposées qui peuvent être utilisées pour corriger la position d’un véhicule. Ensuite, nous proposons un correcteur de position robuste et simple dans les environnements multi-trajets. À cette fin, nous choisissons un correcteur de position complexe et robuste proposé dans la littérature puis, nous utilisons un réseau de neurones pour superviser la dynamique de ce correcteur de position. Notre réseau de neurones remplace avec les mêmes performances le correcteur original mais avec moins de complexité.

5.2 Importance de la localisation dans les réseaux VANET

La plupart des applications VANET considèrent la disponibilité d’informations de position indispensable. Cependant, elles diffèrent, sur l’exactitude de la localisation pour être capable de fonctionner correctement. Par exemple, quelques applications peuvent travailler avec des informations de localisation imprécises, tandis que d’autres applications critiques de sécurité, exigent des systèmes plus précis et plus fiables.

Dans [51], les auteurs ont divisé les applications VANET en trois groupes principaux selon leurs exigences de localisation :

- Applications capables de travailler avec une précision faible : Les applications de cette classe peuvent offrir une meilleure performance quand les informations de position de véhicules sont disponibles. La plupart de ces applications utilisent la com-

munication de véhicule à véhicule (V2V) et de véhicule à une infrastructure (V2I), pour fournir des services comme l’acheminement d’informations et la dissémination de données d’accidents, etc. Les protocoles de routage utilisés peuvent tolérer des erreurs de localisation de l’ordre de 10-20 ou même 30 m, puisque la longueur de la zone de transmission d’émetteurs des véhicules peut compenser ces inexactitudes de localisation.

- Applications exigeant une précision moyenne : Ce type d’application exige un certain degré de précision dans les positions calculées et/ou dans l’évaluation de distance entre des véhicules. Les applications dans ce groupe sont habituellement des applications de Conduite Coopérative, où les véhicules échangent des messages entre eux pour conduire et partager en collaboration l’espace disponible sur la route. Dans ces applications, les véhicules peuvent assumer partiellement le contrôle de la conduite. Dans la plupart des cas, les erreurs de localisation acceptables sont entre 1 et 5 mètres.
- Applications exigeant une précision élevée : La plupart de ces applications sont des applications critiques de sécurité comme les systèmes d’avertissement de collision de véhicule (Collision Warning Systems CWS) et de stationnement automatique. Dans ces applications, le conducteur est informé de l’environnement pour assurer la sécurité, et en cas d’urgence, le véhicule peut exécuter quelques procédures automatiques. Celles-ci sont les applications les plus intéressantes pour VANET et donc la sécurité, la fiabilité et la précision d’information de position sont cruciales.

Le tableau 5.1 résume les applications VANET ainsi que leurs exigences de localisation [51].

TABLE 5.1 – Comparaison entre précision de la localisation des applications VANET

Application	Faible	Moyenne	Élevée
Routage	✓	✗	✗
Dissémination de données	✓	✗	✗
Carte de localisation	✓	✗	✗
Gestion d’intersection	✗	✓	✗
Contrôle de la vitesse	✗	✓	✗
Platooning	✗	✓	✗
Alerte de changement de voie	✗	✓	✗
Alerte de collision	✗	✗	✓
Alerte de distance de sécurité	✗	✗	✓
Stationnement automatique	✗	✗	✓

5.3 Techniques de correction des positions des nœuds dans les réseaux VANET

Le GPS est considéré comme un système de localisation efficace pour les environnements ouverts. Il peut fournir une position et une vitesse précise sur une longue période de temps. Cependant, le GPS n'est pas considéré comme un système vraiment autonome car il dépend des signaux satellites. Par conséquent, il hérite de tous les inconvénients connus liés à la propagation du signal tels que : le multi-trajets, l'atténuation et le blocage de signal. Par exemple, les positions ne peuvent pas être calculées dans un tunnel ou dans une forêt, et de plus la précision de positionnement se détériore souvent dans les environnements urbains en présence de multi-trajets.

De nombreuses techniques sont proposées dans la recherche et dans l'industrie pour augmenter la précision des dispositifs GPS, ou simplement pour traiter les positions en l'absence de signal GPS. Le système (INS) est l'une de ces techniques. Dans cette technique, lorsque le signal GPS est temporairement indisponible, un nœud mobile estime sa position actuelle en fonction de sa dernière position GPS mesurée et ses paramètres de mouvement (vitesse, orientation et temps). Les applications VANET utilisent le système INS pour maintenir la localisation dans des endroits où le signal GPS ne peut pas être reçu, comme dans les tunnels, les parkings intérieurs, etc.

Les performances de système INS dépendent de la précision des capteurs de vitesse et d'orientation embarqués et de la durée d'utilisation. Par conséquent, INS ne peut pas fonctionner comme un système de navigation autonome, car il ne fournit des positions précises que pendant une courte période, mais pendant une longue période, les erreurs d'estimation accumulées dégradent les performances du système.

L'amélioration de la précision du GPS a attiré l'intérêt des chercheurs et de l'industrie et différentes solutions ont été proposées pour améliorer la précision des positions. Cependant, nous ne pouvons pas trouver une solution efficace et robuste qui puisse être utilisée pour tous les types d'applications et dans tous les environnements. Mais, il est clair que certaines méthodes donnent généralement de meilleures performances que d'autres.

La combinaison de deux ou plusieurs techniques de localisation peut améliorer la précision et fournir des performances supérieures par rapport à un système autonome. Ainsi, il est possible d'utiliser Map Matching avec GPS, Map Matching avec INS, etc. Mais la solution la plus utilisée est l'intégration GPS/INS. Les systèmes GPS/INS donnent généralement une grande précision de position pendant une courte période de temps. En

effet, chaque système compense les insuffisances de l'autre lorsqu'il est utilisé séparément.

Les techniques basées sur l'intégration GPS/INS peuvent être classées en trois groupes de méthodes : méthodes d'estimation, méthodes intelligentes et méthodes hybrides.

5.3.1 Méthodes d'estimation

Dans les méthodes d'estimation classique, il est possible de prédire les états des systèmes dynamiques en utilisant toutes les observations passées. Ensuite, une estimation filtrée de l'état du système est calculée en utilisant la nouvelle observation et une prédiction. Les méthodes couramment utilisées dans cette classe est le filtre de Kalman (Kalman Filter (KF)), le filtre de Kalman étendu (Extended Kalman Filter (EKF)), le filtre de Kalman inodore (Unscented Kalman Filter (UKF)) et les méthodes séquentielles de Monté Carlo (Sequentiel Monte Carlo (SMC)). L'intégration du récepteur GPS et les données des méthodes d'estimation dans les techniques de localisation dans VANET est un sujet bien étudié [101, 102].

Par exemple, dans [101], les auteurs ont présenté une approche directe de filtre de Kalman pour l'intégration GPS/INS. Dans cette approche, les données prétraitées par GPS sont considérées comme des données de mesure ; les données prétraitées par INS sont considérées comme des informations supplémentaires à la prédiction d'état du filtre de Kalman. L'avantage de cette approche est qu'un filtre de Kalman simple et linéaire est mis en œuvre pour réaliser et optimiser le calcul avec des performances compétitives.

Dans [102], les auteurs ont présenté un schéma d'estimation de position pour les véhicules basé sur l'intégration du système de positionnement global différentiel (DGPS) avec le système de navigation inertielle (INS). Leur objectif est d'atteindre une précision suffisante dans le système coopératif d'avertissement de collision d'un véhicule donné, c'est-à-dire des systèmes qui avertissent les conducteurs en fonction des informations sur les mouvements des véhicules voisins obtenus par des communications sans fil entre les véhicules. La grande précision de ce travail est obtenue en considérant la non-linéarité dans leur modèle dynamique, et l'utilisation d'un filtre de Kalman étendu (EKF) comme un outil de fusion.

L'amélioration de la précision de l'intégration GPS/INS par méthodes d'estimation a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années [103, 104].

Le travail proposé dans [103] a été basé sur la recherche de l'intégration de GPS et INS, en utilisant le Filtre de Kalman (KF) et le filtre de Kalman étendu (EKF) pour compenser l'erreur générée par la fusion de l'information.

Dans [104], une technologie de navigation basée sur le filtre de Kalman adaptatif (AKF) avec facteur d'atténuation est proposée pour limiter le bruit. L'algorithme met à jour en permanence la variance du bruit de mesure et traite la variance du bruit du système en collectant les valeurs estimées et mesurées.

5.3.2 Méthodes intelligentes

Les techniques les plus utilisées dans cette classe sont les réseaux de neurones [105, 106, 107, 108]. Dans cette catégorie, un réseau de neurone artificiel est généralement utilisé pour superviser des quantités non modélisées ou non mesurées telles que des erreurs de capteurs INS ou de récepteur GPS. De nombreuses autres techniques intelligentes basées sur la logique floue et les algorithmes génétiques sont également proposées.

Par exemple, dans [105], un système intelligent est proposé pour améliorer la précision des erreurs de l'angle et des erreurs de la vitesse estimées par INS. Pour cela trois architectures de réseau de neurones ont été proposées, nommées AUA (Angle Update Architecture), VUA (Velocity Update Architecture) et PUA (Position Update Architecture) où AUA et VUA travaillent en parallèle. Les entrées sont l'angle et la vitesse INS pour AUA et VUA respectivement, les entrées de PUA sont les sorties des deux réseaux (l'angle et la vitesse), les sorties de PUA sont les erreurs de positions. L'utilisation de réseau de neurones améliore considérablement la précision de la position en cas de longue période de perte du signal GPS.

Un autre schéma est proposé dans [106], il utilise un système multi-capteurs intégrant des données GPS/INS et vise à résoudre le problème des erreurs et des bruits stochastiques des capteurs inertiels. Pour cela, une architecture basée sur le réseau de neurones RBF (Radial Basis Function) est utilisée pour prédire les positions INS. Le réseau de neurones est formé à l'aide des données INS et GPS et il est utilisé pour comparer les positions INS et GPS en différents niveaux de résolution, puis il est utilisé lors de la panne du signal GPS pour prédire les erreurs INS.

Dans [107], les auteurs ont constaté que les erreurs des positions GPS varient périodiquement. Ainsi, ils concluent que l'utilisation du temps comme entrée d'un réseau de neurones est suffisant pour donner l'erreur du GPS. Ce système ne peut pas fonctionner comme un système de localisation autonome, il améliore seulement les positions GPS lorsque les signaux GPS sont disponibles.

Dans [108], le réseau de neurones est utilisé pour modéliser les erreurs des positions INS. Le réseau de neurones est entraîné lors de la disponibilité du signal GPS. La sortie

désirée est la différence entre la position GPS et la position INS. Durant la phase de généralisation, la position INS et le temps sont les entrées de réseau de neurones utilisé pour prédire l'erreur de position correspondante. L'erreur de position est ensuite soustraite de la position INS correspondante pour obtenir la position corrigée.

5.3.3 Méthodes hybrides

Dans les méthodes de fusion hybride, les techniques d'estimation et les techniques intelligentes sont combinées pour fournir une grande précision ou pour réduire la complexité de la conception d'un correcteur de position. Dans les méthodes hybrides, en général, un Filtre de Kalman (KF) est utilisé avec un réseau de neurones qui modélisent les erreurs de l'INS ou du GPS [109, 110, 111, 112].

Par exemple, les auteurs dans [109] ont utilisé une combinaison de filtres de Kalman et de réseau de neurones pour augmenter la précision en cas de blocage du signal GPS. Le réseau de neurones utilisé dans cette approche a comme entrée la position INS et le temps et comme sortie l'erreur de la position. Les simulations effectuées montrent que le schéma proposé peut améliorer considérablement la précision des pannes de GPS.

Dans le but d'améliorer la précision de positionnement du système d'intégration GPS/INS pendant les pannes GPS, un nouveau modèle [110] combine les algorithmes de filtrage et le réseau de neurones pour la compensation des erreurs INS. Les algorithmes de filtrage sont utilisés pour estimer les erreurs INS, le réseau de neurones est utilisé pour établir un modèle très précis lorsque le GPS fonctionne bien et pour prédire les erreurs INS en cas de panne du GPS. Les résultats expérimentales montrent que le modèle proposé peut effectivement fournir des corrections très précises du système autonome INS lors des pannes GPS.

Dans [111], une approche hybride consiste à utiliser le réseau de neurones IDNN (Input delayed Dynamic Neural Network) et le filtre de kalman pour l'intégration GPS/INS. Dans cette approche, le filtre de Kalman est utilisé pour fournir la solution de navigation lorsque le signal GPS est disponible. Lorsque les signaux GPS ne sont pas disponibles, le réseau de neurones formé est utilisé pour la compensation de la position INS qui est effectuée par le filtre de kalman lorsque le GPS est disponible. Une autre technique est proposée dans [112] où le réseau neural est utilisé comme un module pour détecter la présence de multi-trajets.

La plupart des techniques d'intégration de GPS/INS utilisent le Filtre de Kalman (pour améliorer la position d'un véhicule pendant la disponibilité du signal GPS) ou/et

les réseaux de neurones (pour corriger les positions INS en cas d'absence ou blocage du signal GPS). Dans l'annexe A et B nous décrivons le principe général de chacun de ces outils.

Le tableau 5.2 résume les techniques de correction des positions des nœuds dans les réseaux VANET.

TABLE 5.2 – Comparaison des techniques de correction des positions des nœuds dans les réseaux VANET

Technique	Type	Données fusionnées	Outil de fusion
[101]	Estimation	GPS, INS	Filtre de Kalman (KF)
[102]	Estimation	DGPS, INS	Filtre de Kalman étendu (EKF)
[103]	Estimation	GPS, INS	KF, EKF
[104]	Estimation	GPS, INS	Filtre de Kalman adaptatif (KFA)
[105]	Intelligente	INS	Réseau de neurones artificiel (RNA)
[106]	Intelligente	GPS, INS	RNA
[107]	Intelligente	GPS	RNA
[108]	Intelligente	GPS, INS	RNA
[109, 110, 111, 112]	Hybride	GPS, INS	KF, RNA

5.4 RISC : Reduced Integration Scheme Complexity

La plupart des techniques proposées pour l'intégration GPS/INS sont basées sur différents schémas de Filtre de Kalman avec différents degrés de complexité. Une analyse de ces schémas montre que la complexité dépend de la précision désirée, du temps de calcul et du coût global du système. Par conséquent, le véritable défi consiste maintenant à concevoir un système à faible coût et haute performance, même dans des conditions de trajets multiples difficiles.

Dans cette section, nous proposons un estimateur de position robuste, simple et qui fonctionne dans les environnements à trajets multiples sévères [32]. Pour cela, nous choisissons un correcteur de position complexe et robuste proposé dans la littérature [112] puis, nous utilisons un réseau de neurones pour superviser la dynamique de ce correcteur de position. Par la suite le réseau de neurones remplace le correcteur original complexe avec les mêmes performances mais avec moins de calcul et de complexité.

L'utilisation de réseaux neuronaux est justifiée par le fait que le réseau de neurones à une seule couche cachée peut apprendre n'importe quelle fonction bornée non linéaire [113].

La mise en œuvre de notre nouveau système de correction (RISC) peut être réalisée en trois étapes : phase de revue et d'évaluation, phase d'apprentissage et phase de correction.

5.4.1 Phase de revue et d'évaluation

Pour montrer l'efficacité de notre approche RISC, nous devons choisir un schéma qui donne une position de haute précision dans un environnement urbain et ouvert, ces schémas sont généralement très complexes. De nombreux schémas répondant à ces critères peuvent être trouvés et utilisés. Dans notre contribution RISC, nous avons simplement choisi celui publié dans [112], appelée Inter-vehicle-Communication-Assisted Localization (IVCAL). Dans ce schéma (Voir la figure 5.1), trois unités principales sont utilisées : (i) unité de fusion GPS/INS à l'aide de filtre de Kalman (KF), (ii) unité de détection de multi-trajets (MDU) qui peut détecter la présence d'effet multi-trajets à partir de la sortie de KF et (iii) unité de correction de la localisation (LEU) qui utilise les informations obtenues des véhicules dans le voisinage pour fournir une position estimée au KF.

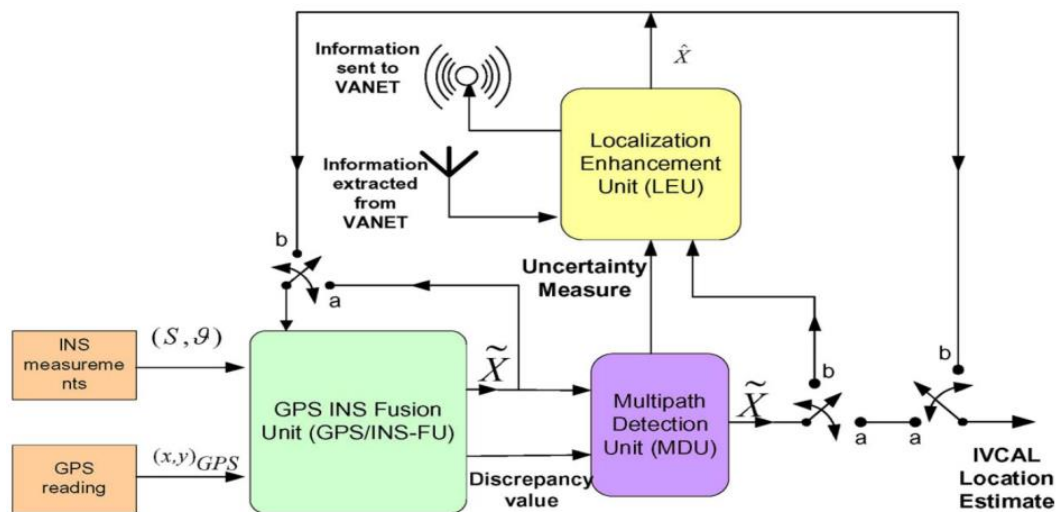


FIGURE 5.1 – Architecture de la technique IVCAL

5.4.1.1 Unité de fusion GPS/INS

Dans la technique IVCAL, chaque véhicule utilise une unité de fusion GPS/INS (GPS/INS-FU) pour intégrer les mesures de l'INS et du GPS en utilisant le Filtre de Kalman (voir la Figure 5.2).

Les entrées INS sont appliquées comme entrées au Filtre de Kalman et les valeurs GPS sont utilisées pour mettre à jour les estimations des valeurs INS.

L'emplacement d'un véhicule peut être modélisé comme suit :

$$x_t^- = x_{t-1}^+ + \Delta t \left(V_{t-1} * \begin{pmatrix} \cos(\theta_{t-1}) \\ \sin(\theta_{t-1}) \end{pmatrix} \right)$$

Où,

- x_{t-1}^+ est l'emplacement exact du véhicule à l'instant $t - 1$,
- Δt est la durée de la période d'échantillonnage,
- V_{t-1} est la vitesse du véhicule à l'instant $t - 1$,
- $\theta_{t-1} \in [0^\circ, 360^\circ]$ est la direction du véhicule par rapport à l'axe global.

Un Filtre de Kalman discret est utilisé pour intégrer ces deux mesures comme suit :

$$x_t^+ = x_t^- + G_t (Z_t - x_t^-)$$

Où,

- x_t^- est l'emplacement estimé du véhicule à l'instant t ,
- G_t est le gain de Kalman au temps t ,
- Z_t est l'emplacement obtenu par le récepteur GPS.

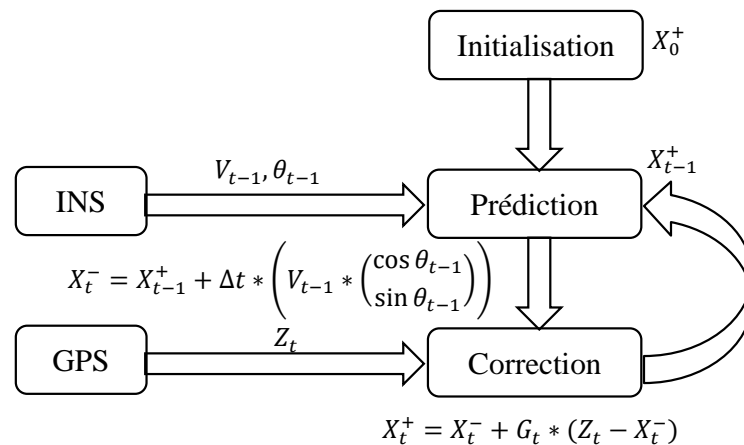


FIGURE 5.2 – Intégration GPS/INS en utilisant le Filtre de Kalman

5.4.1.2 Unité de détection de multi-trajets (MDU)

Dans ce module, les auteurs ont adopté un réseau neuronal utilisant l’algorithme de rétro-propagation pour détecter la présence d’un effet de multi-trajets afin de déclencher l’unité LEU pour minimiser l’erreur de la localisation. L’entrée du réseau de neurones utilisé est l’écart entre la mesure GPS et l’estimation produite par la mesure INS (voir la Figure 5.3).

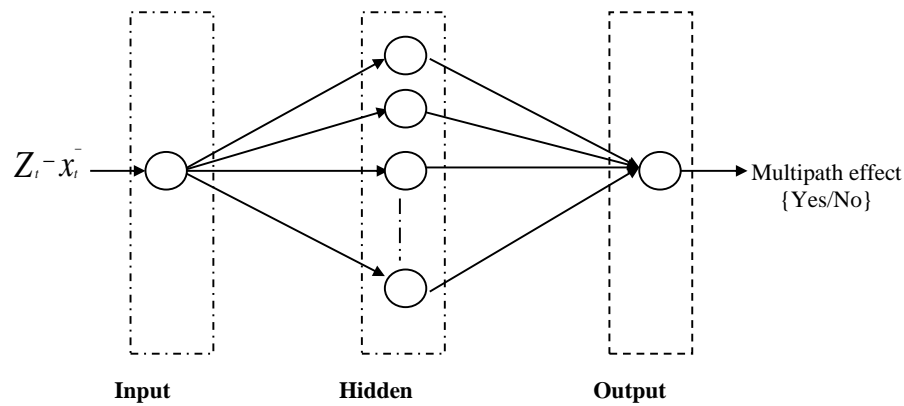


FIGURE 5.3 – Unité de détection de multi-trajets (MDU)

5.4.1.3 Unité de correction de la localisation (LEU)

Ce module est exécuté lorsqu’un véhicule détecte la présence d’un effet de multi trajets en utilisant l’unité MDU. Dans ce cas, le véhicule utilise les positions de ses voisins pour corriger sa position. Ainsi, il peut appliquer la technique de trilatération s’il reçoit au moins trois positions de ses voisins. Cependant, si le véhicule ne détecte pas la présence d’effet de multi trajets, IVCAL utilise la position obtenue par le filtre de Kalman.

5.4.2 Phase d’apprentissage

Dans cette phase, nous alimentons le réseau de neurones (Voir la figure 5.4) avec un ensemble d’entrées et de sorties bornées extraites du schéma de la figure 5.1. En entrée, nous prenons la différence entre les positions INS et GPS ($P_{GPS} - P_{INS}$), et en sortie, nous prenons la différence entre le GPS et la sortie de la technique IVCAL ($P_{GPS} - P_{IVCAL}$). Ce choix est très important car les entrées et les sorties sont bornées et ne nécessitent aucun nouveau capteur. Nous supposons ici que les positions fournies par IVCAL sont très précises et peuvent améliorer le système de localisation.

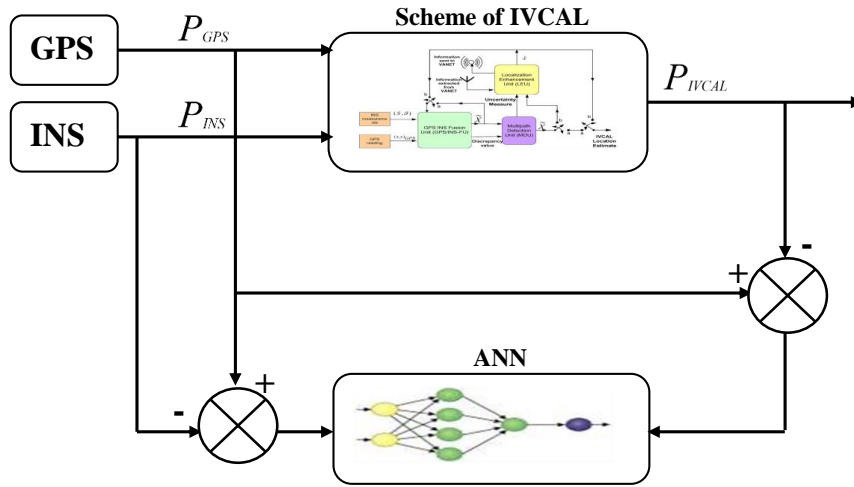


FIGURE 5.4 – Schéma de la phase d'apprentissage

5.4.3 Phase de correction

Après la phase d'apprentissage, le nouveau correcteur de réseau de neurones prend la place du schéma choisi. Conformément au schéma adopté dans la phase d'apprentissage, le schéma de correction de la figure 5.5 est très général et peut être utilisé pour améliorer la précision des positions dans les dégradations du signal GPS ou dans une zone ouverte avec la disponibilité des lectures GPS.

Dans le cas d'un blocage du signal GPS, notre réseau de neurones suppose que la valeur de la position GPS est égale à 0. Par conséquent, la sortie de notre réseau de neurones est égale à $-P_{IVCAL}$ (voir figure 5.4) et la position GPS corrigée égale à P_{IVCAL} (voir figure 5.5).

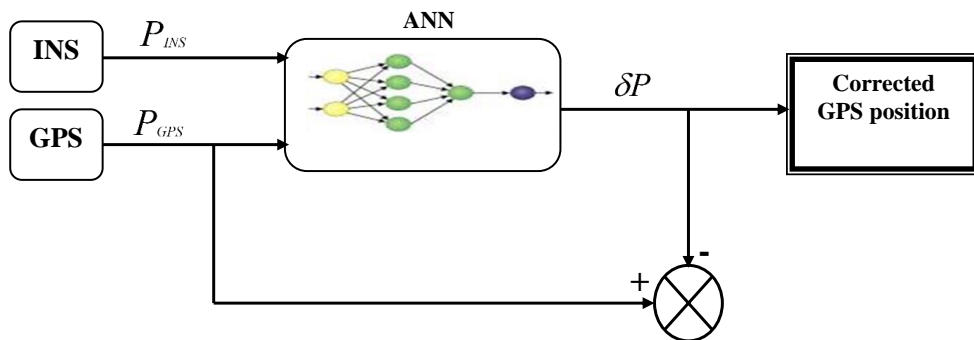


FIGURE 5.5 – Schéma de la phase de correction

5.5 Étude de complexité temporelle

Dans cette section, nous comparons le temps d'exécution de notre technique RISC et celui de IVCAL et nous montrerons que RISC réduit la complexité temporelle.

5.5.1 La complexité temporelle de IVCAL

Pour calculer la complexité, nous considérons d'abord le temps nécessaire pour qu'un véhicule calcule sa position corrigée en cas d'utilisation de la technique IVCAL. Ce temps peut être calculé dans deux cas différents :

Environnement ouvert

En l'absence de multi trajets, seulement deux modules sont utilisés, le module de filtre de Kalman et l'unité de détection de multi trajets. Par conséquent, la durée de fonctionnement peut être calculée comme suit :

$$T_{IVCAL1} = T_{KF} + T_{MDU} \quad (5.1)$$

Où,

- T_{KF} est le temps d'exécution du module de filtre de Kalman.
- T_{MDU} est le temps d'exécution du module de détection de multi trajets.

Environnement urbain (détection de trajet multiples)

Comme dans le premier cas, les mêmes modules sont utilisés mais lors de la détection d'un multi trajets, un troisième module est utilisé pour corriger la position (LEU). Par conséquent, le temps d'exécution peut être exprimé comme indiqué dans l'équation suivante :

$$T_{IVCAL2} = T_{KF} + T_{MDU} + T_{LEU} \quad (5.2)$$

Où,

- T_{LEU} est le temps d'exécution du module de correction de la localisation.

Par conséquent, le temps global de la technique IVCAL peut être considéré comme le maximum de T_{IVCAL1} et T_{IVCAL2} ($T_{IVCAL} = \max(T_{IVCAL1}, T_{IVCAL2})$).

Alors,

$$T_{IVCAL} = T_{IVCAL2} = T_{KF} + T_{MDU} + T_{LEU} \quad (5.3)$$

5.5.2 La complexité temporelle de notre approche RISC

Notre technique RISC est mise en œuvre en deux phases : une phase d'apprentissage et une phase de généralisation. Parce que l'apprentissage de notre réseau de neurones se fait hors ligne, le temps d'exécution de notre technique (T_{RISC}) est égal au temps d'exécution de la phase de généralisation.

Dans RISC, nous avons utilisé les mêmes paramètres du réseau de neurones de l'unité de détection de multi-trajet (MDU). Par conséquent, le temps d'exécution de RISC (T_{RISC}) est égal à celui du module MDU (T_{MDU}) de la technique IVCAL. Donc,

$$T_{RISC} = T_{MDU} \quad (5.4)$$

Il est évident et clair que l'utilisation d'un réseau de neurones dans notre contribution plutôt qu'un module KF, module de détection multi-trajets (MDU) et un module de correction de la localisation (LEU) dans la technique IVCAL, réduit considérablement la complexité temporelle ($T_{RISC} < T_{IVCAL}$).

5.6 Simulation et analyses

Notre technique RISC est examinée et analysée au cours de la phase d'apprentissage et de correction à l'aide de Matlab7. Les paramètres d'implémentation de notre réseau de neurones sont présentés dans le Tableau 5.3, et les paramètres de simulation sont donnés par le Tableau 5.4.

Pour générer les données qui seront utilisées dans la phase d'apprentissage, nous avons implémenté la technique IVCAL en utilisant Matlab7. Ensuite, nous avons généré trois ensembles de données afin de vérifier la robustesse et le fonctionnement du nouveau correcteur.

- Ensemble 1 : Contient les entrées et les sorties générées dans un environnement ouvert, où ($|error| < 30m$).
- Ensemble 2 : Contient des données générées en environnement urbain, où ($|error| < 150m$).

- Ensemble 3 : Regroupe les données de l'ensemble 1 et l'ensemble 2.

TABLE 5.3 – Paramètres d'implémentation de notre réseau de neurones

Paramètres	Valeur
Algorithme d'apprentissage	back-propagation
Fonction d'activation	Fonction Sigmoid
Nombre de neurones d'entrées	1
Nombre de couches cachées	Une seule couche cachée de 30 neurones
Nombre de neurones de sorties	1

TABLE 5.4 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeur
Nombre de véhicules	100
Vitesse moyenne	50km/h
Longueur de l'autoroute	1km
Période de lecture du récepteur GPS	1s

Une fois les trois ensembles générés, nous exécutons la deuxième phase et nous entraînons le réseau de neurones. Après avoir essayé plusieurs simulations, nous avons finalement sélectionné un réseau de neurones avec une seule couche cachée de 30 neurones, qui utilise l'algorithme de rétro-propagation.

Pour tester le réseau de neurones pré-entraîné, nous utilisons de nouveau un ensemble d'entrées (non utilisées dans la phase d'apprentissage) et nous comparons les sorties obtenues par notre correcteur de position GPS avec les sorties obtenues par la technique IVCAL.

En utilisant les données de l'ensemble 1 représentant un environnement ouvert, les résultats de la figure 5.6 montrent que notre réseau de neurones correcteur donne les mêmes performances que la technique IVCAL. À partir des résultats obtenus, nous remarquons que les erreurs de RISC sont toujours entre $+10m$ et $-10m$ par contre les erreurs GPS sont toujours entre $+30m$ et $-30m$. Ainsi, la performance globale de RISC est d'environ 66.66%.

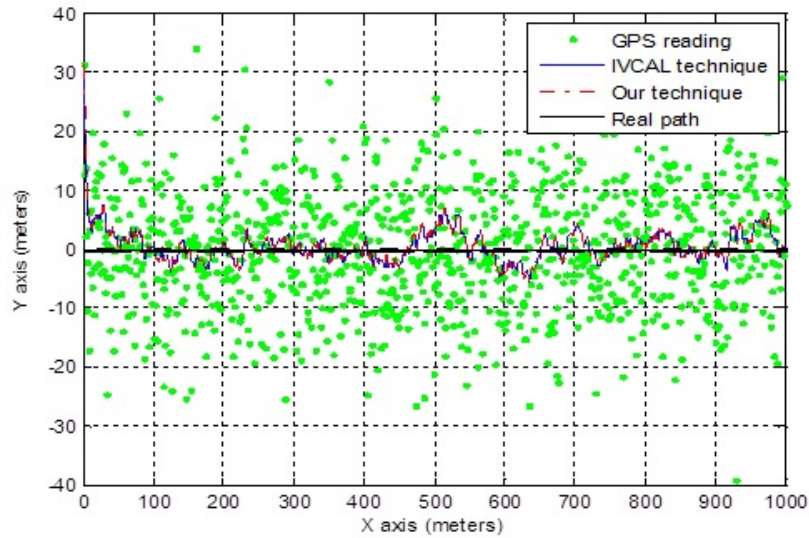


FIGURE 5.6 – Comparaison des performances de notre technique RISC avec IVCAL en environnement ouvert

Dans l'environnement multi-trajets sévère, et en utilisant des données de l'ensemble 2, les résultats de la figure 5.7 montrent que les courbes de RISC et IVCAL sont superposées ce qui signifie que notre correcteur a amélioré la précision des positions dans un tel environnement et donne les mêmes performances obtenues par IVCAL.

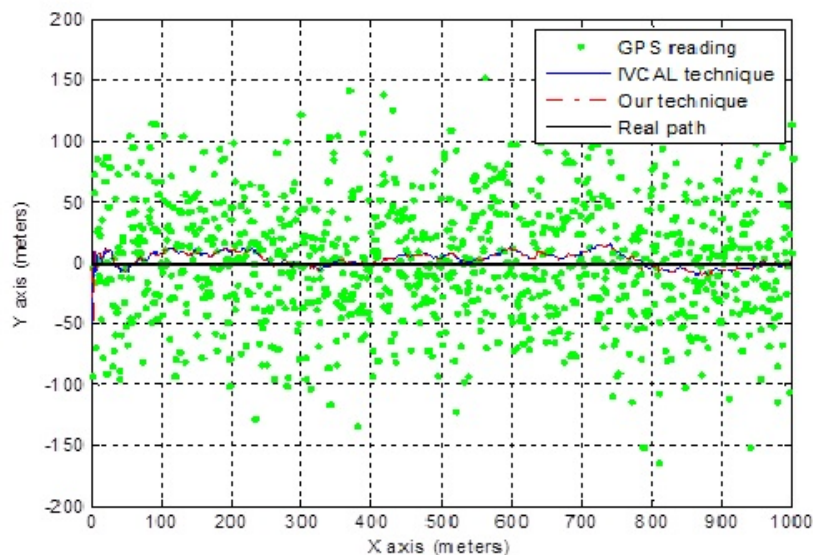


FIGURE 5.7 – Comparaison des performances de RISC avec IVCAL en environnement multi-trajets

CHAPITRE 5. CORRECTION DES POSITIONS DES NŒUDS MOBILES

Nous remarquons que l'erreur avec RISC est comprise entre $+15m$ et $-10m$ et les erreurs GPS sont comprises entre $+150m$ et $-150m$. Par conséquent, nous pouvons dire que le taux de réussite de notre contribution RISC est d'environ 91.66%.

Pour tester la robustesse de notre schéma proposé, nous utilisons un ensemble hybride de données de l'ensemble 1 et l'ensemble 2 dans la phase d'apprentissage, et comme dans les cas ci-dessus, nous choisissons de valider les performances de notre réseau neurones correcteur avec de nouvelles données.

La figure 5.8 illustre les bonnes performances de notre technique, ce qui donne une grande précision et sans utiliser un module supplémentaire pour détecter la présence de trajets multiples.

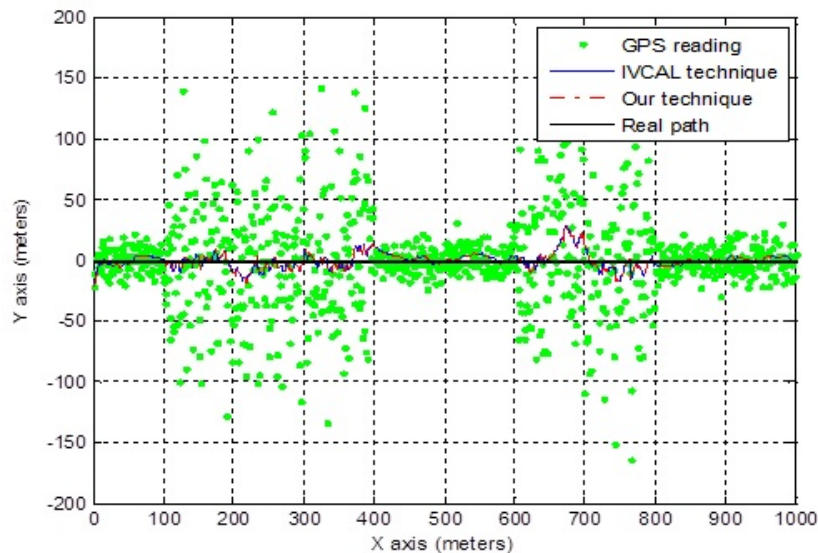


FIGURE 5.8 – Comparaison des performances de RISC avec IVCAL en environnement hétérogène

D'après les résultats obtenus par la figure 5.9, nous avons observé que l'erreur de RISC est comprise entre $+29m$ et $-21m$. Donc, nous pouvons donc dire que notre réseau de neurones a un taux de réussite égal à 83.33%.

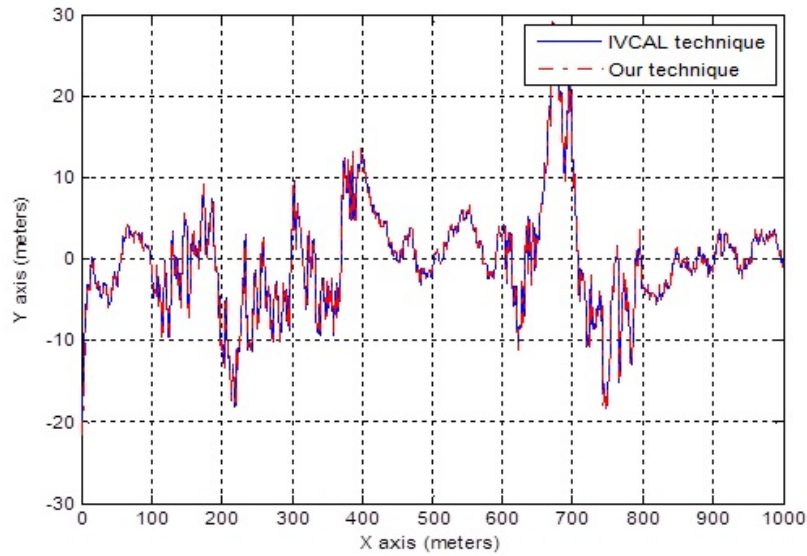


FIGURE 5.9 – Erreur de position dans un environnement hétérogène

La figure 5.10 montre que notre technique RISC donne les mêmes performances que la technique IVCAL dans un environnement hétérogène, où l'erreur quadratique moyenne entre RISC et IVCAL est égale à $0.0525m$.

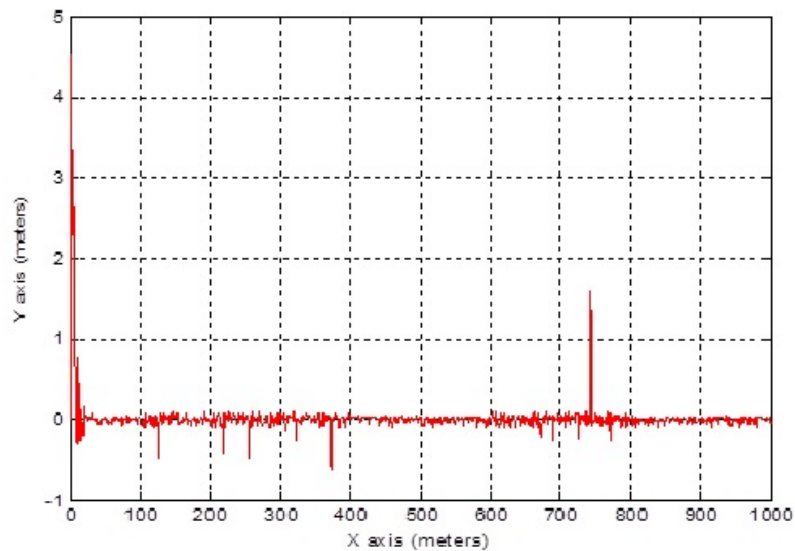


FIGURE 5.10 – Erreur entre la position de RISC et de IVCAL dans un environnement hétérogène

5.7 Conclusion

Localiser un véhicule semble être une question facile si chacun des nœuds utilise un récepteur GPS. Mais, il est difficile de se localiser de manière précise. Les positions GPS sont souvent entachées d'erreurs causées par le masquage des satellites et le phénomène de multi-trajets. Pour remédier à ces erreurs, le système de navigation inertielle INS peut être utilisé avec le GPS de manière complémentaire. Pour cela, plusieurs techniques d'intégration GPS/INS ont été proposées.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes applications qui exigent la localisation des nœuds. Nous avons examiné quelques techniques de correction des positions GPS dans les réseaux VANET à l'aide des techniques d'intégration GPS/INS.

Ensuite, nous avons présenté une nouvelle technique qui vise à réduire la complexité des techniques proposées dans la littérature et à corriger les positions obtenues par le système GPS dans les réseaux VANET. L'objectif de notre contribution est d'utiliser un réseau de neurones pour superviser d'autres techniques proposées afin de réduire leurs complexités et leurs coûts. Nous avons démontré l'efficacité de notre technique à travers les résultats de la simulation dans différents environnements.

CHAPITRE 6

Conclusion générale et perspectives

Sommaire

6.1	Conclusion	112
6.2	Perspectives	115

6.1 Conclusion

Cette thèse a eu pour objectif d'étudier le problème de la localisation des nœuds dans les environnements mobiles et de proposer de nouvelles solutions qui s'adaptent avec les spécificités de ces environnements. Nous avons proposé trois solutions pour localiser les nœuds mobiles et cela dans différents types de réseaux à savoir les réseaux de drones où aucun nœud n'est équipé de GPS, les réseaux de capteurs avec certains nœuds équipés de GPS et les réseaux de véhicules où tous les nœuds sont équipés de GPS.

1. Le comportement des réseaux de drones peut apparaître comme des unités totalement indépendantes les unes des autres. Cependant, quand une flotte de drones avec un contrôle décentralisé effectue une tâche arbitraire dans un espace intérieur fermé, il y a toujours un risque non négligeable de collisions intra-flotte. C'est une condition d'échec à éviter pour assurer le succès de la mission.

L'évitement des collisions dans un groupe de drones devient facile avec l'emplacement relatif des drones. Dans les missions extérieures, les récepteurs du système de positionnement global (GPS) peuvent être utilisés pour obtenir des données de position globale qui sont ensuite partagées, mais cela ne fonctionne pas en intérieur. Pour cela des techniques de localisation relative ont été proposées dans lesquelles chaque drone peut alors communiquer avec ses voisins pour en déduire leurs positions relatives.

Afin de résoudre les problèmes posés par les groupes de drones dans les environnements intérieurs, nous avons proposé une nouvelle technique de localisation relative qui ne nécessite aucune information GPS et par conséquent elle peut être utilisée dans les environnements intérieurs. Elle consiste à utiliser une référence commune (par exemple station sol ou un nœud drone simple) et à estimer les positions des nœuds drones par rapport à cette référence en fonction des distances mesurées entre eux et de la technique de la multilatération. Les distances entre les drones sont calculées à l'aide de la puissance du signal reçu (RSSI). Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de notre technique même dans des environnements à trajet-multiples.

2. La localisation des nœuds dans les réseaux de capteurs joue un rôle important dans diverses applications. Elle permet de proposer aux utilisateurs un service dépendant de leurs positions ou de réaliser des fonctions essentielles au réseau (routage, configuration de topologie de réseau, couverture, etc.).

Une alternative prometteuse pour localiser les réseaux de capteurs est d'utiliser une ancre mobile, cette ancre équipée d'un GPS circule dans toute la zone de déploiement du réseau de capteurs en diffusant les informations nécessaires aux nœuds pour les aider à se localiser. Les capteurs ne peuvent estimer leurs positions que lorsque l'ancre mobile est proche d'eux, ce qui est lent, surtout quand la taille de la zone est grande et la trajectoire n'est pas optimale.

Dans ce contexte-là, nous avons présenté deux nouvelles approches de localisation à l'aide d'une ancre mobile :

- La première approche vise à réduire la longueur de la trajectoire des ancres mobiles, à déterminer la position des ancres virtuelles, à garantir que tous les nœuds puissent recevoir au moins quatre messages pour se localiser et à améliorer la précision des positions.
- La deuxième approche proposée vise à définir une trajectoire optimale de l'ancre mobile, à réduire le nombre de messages reçus et par conséquent à réduire la consommation d'énergie des nœuds capteurs.

L'analyse analytique et les résultats de la simulation montrent que notre trajectoire avec carré permet d'améliorer la précision de la position et d'augmenter le taux de réussite de localisation des nœuds capteurs. D'autre part, notre trajectoire avec triangle permet de réduire la longueur de la trajectoire, de réduire le nombre d'ancres virtuelles et d'économiser la consommation d'énergie des nœuds capteurs.

3. Les réseaux VANET constituent un nouveau type de réseaux issu des réseaux MANET. Leur particularité provient des communications qui peuvent s'instaurer entre véhicules ou bien avec une infrastructure. La mobilité est également largement plus contraignante que dans les réseaux ad hoc traditionnels.

De nombreuses informations peuvent être échangées dans le contexte des VANET, notamment pour alerter les conducteurs lorsqu'un événement survient (accident, freinage d'urgence, véhicule quittant une place de stationnement et souhaitant en informer les autres, etc.).

Dans ces réseaux, le GPS est largement utilisé comme un système de localisation, mais il n'offre pas une bonne précision à cause de plusieurs sources d'erreurs. Pour remédier à ce problème, l'intégration GPS/INS peut être considérée comme une solution dans certains cas. Cependant, la complexité des techniques d'intégration

GPS/INS visant à améliorer la précision des positions GPS augmente avec l'augmentation de la précision requise.

Dans ce contexte-là, nous avons proposé une nouvelle technique basée uniquement sur un réseau de neurones qui vise à réduire la complexité des techniques proposées dans la littérature et à corriger les positions obtenues par le système GPS dans les réseaux VANET. L'objectif de l'utilisation de cette technique est d'obtenir au moins les mêmes performances que les techniques existantes et de montrer qu'un réseau de neurones peut émuler le comportement d'un estimateur donné pour le remplacer, dans le but de fournir une meilleure précision avec des complexités de calcul et du temps plus faible.

Nous avons montré l'efficacité de notre technique par des simulations dans différents environnements, par conséquent notre réseau de neurones peut être utilisé pour superviser d'autres techniques de correction des positions GPS et il peut donner les mêmes performances avec un coût et une complexité réduite.

6.2 Perspectives

Plusieurs perspectives et extensions futures à nos contributions peuvent être envisagées :

Pour la localisation à l'aide d'une ancre mobile dans les réseaux de capteurs sans fil, nous proposons :

- De combiner les deux techniques proposées et d'utiliser les fonctions d'optimisation pour avoir une technique qui permet à la fois de réduire l'erreur de localisation et d'économiser l'énergie des capteurs.
- De proposer une nouvelle trajectoire dynamique de l'ancre mobile pour les environnements avec des obstacles.
- D'utiliser nos trajectoires pour résoudre les problèmes de la couverture et de la collecte de données dans les réseaux de capteurs sans fil.

Pour le contexte de correction des positions GPS par fusion de données dans les réseaux VANET, nous proposons :

- De fusionner plusieurs sources d'informations (au lieu d'intégrer seulement GPS et INS) pour améliorer la précision de la position.
- D'utiliser d'autres techniques de fusion de données plus performantes que le filtre de Kalman.

Bibliographie

- [1] Abdellatif Chafik. *Architecture de réseau de capteurs pour la surveillance de grands systèmes physiques à mobilité cyclique*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2014.
- [2] Yasmine Derdour. *Conception et Développement d'un Système d'Exploration basé sur les Réseaux de Capteurs sans Fil avec Sink Mobile*. PhD thesis, Université d'Oran, 2015.
- [3] Imene Aloui. *Une Approche Agent Mobile Pour Les Réseaux de Capteurs*. PhD thesis, Université de Biskra, 2016.
- [4] Bouabdellah Kechar. *Problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université d'Oran, 2010.
- [5] Yacine Challal. *Réseaux de Capteurs Sans Fils*. Systèmes Intelligents pour le Transport, 2016.
- [6] D.D.Chaudhary, S.P.Nayse, and L.M.Waghmare. Wireless sensor networks for greenhouse parameter control in precision agriculture. *International Journal of Wireless AND Mobile Networks (IJWMN)*, 3(1) :140–149, 2011.
- [7] D.He, N.Kumar, J.Chen, C.C.Lee, and N.Chilamkurti. Robust anonymous authentication protocol for health-care applications using wireless medical sensor networks. *International Journal of Multimedia Systems*, 21(1) :49–60, 2015.

-
- [8] S.Al-Sultan, M.M. Al-Doori, A.H. Al-Bayatti, and H.Zedan. A comprehensive survey on vehicular ad hoc network. *International Journal of Network and Computer Applications*, 37(1) :380–392, 2014.
- [9] Qiming Zhang. *A Pervasive Prediction Model for Vehicular Ad-hoc NETWORK (VANET)*. PhD thesis, Nottingham Trent University, School of Science and Technology, 2017.
- [10] Djamel Bektache. *Application et Modélisation d’un protocole de communication pour la sécurité routière*. PhD thesis, Université d’Annaba, 2014.
- [11] S.B.Krishna. Study of ad hoc networks with reference to manet, vanet, fanet. *International Journals of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 7(7) :390–394, 2017.
- [12] Sara Benkouider. Étude du problème de localisation dans les réseaux vanet. Master’s thesis, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2009.
- [13] Ons BOUACHIR. *Conception et mise en œuvre d’une architecture de communication pour mini- drones civils*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2014.
- [14] Abdessamad Ait El Cadi. *Planification de trajectoires pour une flotte d’UAVS*. PhD thesis, Université de Montréal, 2010.
- [15] Jean Aimé Maxa. *Architecture de communication sécurisée d’une flotte de drones*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2017.
- [16] E.W.Frew and T.X.Brown. Networking issues for small unmanned aircraft systems. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 54(1-3) :21–37, 2009.
- [17] O.S.Oubbati, A.Lakas, F.Zhou, M.Günes, N.Lagraa, and M.B.Yagoubi. A survey on position-based routing protocols for flying ad hoc networks (fanets). *Vehicular Communications*, 10 :29–56, 2017.
- [18] Md.H.Tareque, Md.S.Hossain, and M.Atiqzaman. On the routing in flying ad hoc networks. In *2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), Lodz, Poland*, pages 1–9, 2015.
- [19] I.Bekmezci, O.K.Sahingoz, and S.Temel. Flying ad-hoc networks (fanets) : A survey. *Ad Hoc Networks*, 11 :1254–1270, 2013.

- [20] A.Mukherjee, V.Keshary, K.Pandya, and N.Dey. Flying ad hoc networks : A comprehensive survey. *Information and Decision Sciences*, 701 :569–580, 2018.
- [21] B.D.Soni, J.H.Jobanputra, and L.Saraswat. A comprehensive survey on communication protocols for fanet. *International Journal for Scientific Research and Development*, 1(3) :31–34, 2016.
- [22] M.B.Yassein and N.A.Damer. Flying ad-hoc networks : Routing protocols, mobility models, issues. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 7(6) :162–168, 2016.
- [23] E.Yanmaz, C.Costanzo, C.Bettstetter, and W.Elmenreich. A discrete stochastic process for coverage analysis of autonomous uav networks. In *IEEE Globecom Workshops, Miami, FL, USA*, pages 1777–1782, 2010.
- [24] A.jari, C.Calafate, J.Cano, P.Manzoni, C.E.Palazzi, and D.Ronzani. Flying ad-hoc network application scenarios and mobility models. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 13(10) :1–17, 2017.
- [25] K.K.Kashyap and A.Agrawal. Fanet : Survey on design challenges, application scenario and communication protocols. *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, 5(4) :124–132, 2018.
- [26] Naveen and S.Maakar. Concept of flying ad-hoc network : A survey. In *National Conference on Innovative Trends in Computer Science Engineering (ITCSE)*, pages 178–182, 2015.
- [27] K.Daniel, B.Dusza, A.Lewandowski, and C.W.Airshield. A system-of-systems muav remote sensing architecture for disaster response. In *Systems Conference, 2009 3rd Annual IEEE*, pages 196–200, 2009.
- [28] Y.H.Ho, Y.R.Chen, and L.J.Chen. Krypto : assisting search and rescue operations using wi-fi signal with uav. In *Proceedings of the First Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use, Florence, Italy*, pages 3–8, 2015.
- [29] R.Reshma, T.Ramesh, and P.Sathishkumar. Security situational aware intelligent road traffic monitoring using uavs. In *International conference on VLSI systems, architectures, technology and applications (VLSI-SATA), Bangalore, India*, pages 1–6, 2016.

-
- [30] N.Lagraa, M.B.Yagoubi, and S.Benkouider. Localization technique in vanets using clustering (lvc). *International Journal of Computer Science*, 7(9) :10–16, 2010.
- [31] S.Benkouider, N.Lagraa, M.B.Yagoubi, and A.Benslimane. Optimal mobile beacon trajectories for nodes localisation in wireless sensor networks. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing (IJAHUC)*, 29(1/2) :64–76, 2018.
- [32] S.Benkouider, N.Lagraa, M.B.Yagoubi, and A.Lakas. Reducing complexity of gps/ins integration scheme through neural networks. In *9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Sardinia, Italy*, pages 53–58, 2013.
- [33] Messaoud Kara. *Réseau de capteurs sans fil : étude en vue de la réalisation d'un récepteur GPS différentiel à faible coût*. PhD thesis, Université de Blaise Pascal – Clermont-Ferrand II, 2009.
- [34] DALCE Réjane. *Méthodes de localisation par le signal de communication dans les réseaux de capteurs sans fil en intérieur*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2013.
- [35] C.Alippi and G.Vanini. A rssi-based and calibrated centralized localization technique for wireless sensor networks. In *Proceedings of Fourth IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops. Pisa, Italy*, pages 301–305, 2006.
- [36] Henry Teigar. *Indoor Localisation Using Received Signal Strength*. PhD thesis, UNIVERSITY OF TARTU, 2018.
- [37] J.A.Shaw. Radiometry and the friis transmission equation. *American Journal of Physics*, 81(1) :33–37, 2013.
- [38] F.Izquierdo, M.Ciurana, F.Barcelo, J.Paradells, and E.Zola. Performance evaluation of a toa-based trilateration method to locate terminals in wlan. In *1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing, Phuket, Thailand*, pages 16–18, 2006.
- [39] F.Gustafsson and F.Gunnarsson. Positioning using time-difference of arrival measurements. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Proceedings. (ICASSP '03). Hong Kong, China*, volume 6, 2003.
- [40] D.Niculescu and B.Nath. Ad hoc positioning system (aps) using aoa. In *Proceedings of INFOCOM, San Francisco*, pages 1734–1743, 2003.

- [41] D.Niculescu and B.Nath. Ad hoc positioning system (aps). In *IEEE Global Telecommunications Conference, (GLOBECOM 01), San Antonio, TX, USA*, pages 2926–2931, 2001.
- [42] Y.Hu and X.Li. An improvement of dv-hop localization algorithm for wireless sensor networks. *Telecommunication Systems*, 53(1) :13–18, 2013.
- [43] R.Nagpal, H.Shrobe, and J.Bachrach. Organizing a global coordinate system from local information on an ad hoc sensor network. In *2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '03), Palo Alto, California*, pages 333–348, 2003.
- [44] A.Boukerche, H.A.B.F.Oliveira, E.F.Nakamura, and A.A.Loureiro. Localization systems for wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications – Special Issue on Wireless Sensor Networks*, 14(6) :6–12, 2007.
- [45] G.Han, D.Choi, and W.Lim. Reference node placement and selection algorithm based on trilateration for indoor sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 9(8) :1017–1027, 2009.
- [46] Y.zhou, J.Li, and L.Lamont. Multilateration localization in the presence of anchor location uncertainties. In *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Anaheim, CA, USA*, 2012.
- [47] S.R.Leelavathy and S.Sophia. Providing localization using triangulation method in wireless sensor networks. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 4(6) :47–50, 2014.
- [48] T.He, C.Huang, B.M.Blum, J.A.Stankovic, and T.Abdelzaher. Range-free localization schemes for large scale sensor networks. In *Proceedings of the ACM Conference on Mobile Computing and Networks (MOBICOM'03), San Diego, CA, USA*, pages 81–95, 2003.
- [49] A.Ademuwagun and V.Fabio. Reach centroid localization algorithm. *Wireless Sensor Network*, 9(2) :87–101, 2017.
- [50] Azzedine Boukerche. *Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks*. Wiley, 2008.

-
- [51] A.Boukerche, H.A.B.F.Oliveira, E.F.Nakamura, and A.A.Loureiro. Vehicular ad hoc networks : A new challenge for localization-based systems. *Computer Communications*, 31(12) :2838–2849, 2008.
- [52] B.H.Wellenho, H.Lichtenegger, and J.Collins. *Global Positioning System : Theory and Practice*. 4th ed, Springer-Verlag, 1997.
- [53] Alexandre Ndjeng Ndjeng. *Localisation robuste multi-capteurs et multi-modèles*. PhD thesis, Université d’Evry Val d’Essonne, 2009.
- [54] Les erreurs possibles du gps. <http://legps.e-monsite.com/pages/precision-du-calcul-de-la-distance/les-erreurs-possibles-du-gps.html>. Online ; accessed May-2019.
- [55] T.King, H.Fubler, M.Transier, and W.Effelsberg. Dead-reckoning for position-based forwarding on highways. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT), Hamburg, Germany*, pages 199–204, 2006.
- [56] W.Kang and Y.Han. Smartpdr : Smartphone-based pedestrian dead reckoning for indoor localization. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 15(5) :2906–2916, 2015.
- [57] M.Zhang, Y.Wen, J.Chen, X.Yang, R.Gao, and H.Zhao. Pedestrian dead-reckoning indoor localization based on os-elm. *Special Section On Gnss, Localization, And Navigation Technologies*, 6 :6116–6129, 2018.
- [58] G.R.Jagadeesh, T.Srikanthan, and X.D.Zhang. A map matching method for gps based real-time vehicle location. *Journal of Navigation*, 57(3) :429–440, 2005.
- [59] M.Rohani, D.Gingras, and D.Gruyer. A novel approach for improved vehicular positioning using cooperative map matching and dynamic base station dgps concept. *IEEE Intelligent Transportation Systems*, 17(1) :230–239, 2016.
- [60] M.Chen, D.Haehnel, J.Hightower, T.Sohn, A.LaMarca, I.Smith, D.Chmelev, J.Hughes, and F.Potter. Practical metropolitan-scale positioning for gsm phones. In *International Conference on Ubiquitous Computing, Orange County, California*, page 225–242, 2006.
- [61] H.Liu, H.Darabi, P.Banerjee, and J.Liu. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37(6) :1067–1080, 2007.

- [62] A.S.Kundu, O.Mazumder, A.Dhar, P.K.Lenka, and S.Bhaumik. Scanning camera and augmented reality based localization of omnidirectional robot for indoor application. *Procedia Computer Science*, 105 :27–33, 2017.
- [63] D.Izadi, J.H.Abawajy, S.Ghanavati, and T.Herawan. A data fusion method in wireless sensor networks. *Sensors*, 15(2) :2964–2979, 2015.
- [64] H.Wymeersch, J.Lien, and M.Win. Cooperative localization in wireless networks. *Proceedings of the IEEE*, 97(2) :427–450, 2009.
- [65] G.M.Hoang, B.Denis, , J.Härri, and D.T.M.Slock. On communication aspects of particle-based cooperative positioning in gps-aided vanets. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Gothenburg, Sweden*, 2016.
- [66] M.Saska, T.Baca, J.Thomas, J.Chudoba, L.Preucil, T.Krajnik, J.Faigl, G.Loianno, and V.Kumar. System for deployment of groups of unmanned micro aerial vehicles in gps-denied environments using onboard visual relative localization. *Autonomous Robots*, 41(4) :919–944, 2017.
- [67] R.M.Alkan, H.Karaman, and M.Sahin. Gps, galileo and glonass satellite navigation systems and gps modernization. In *Proceedings of 2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Istanbul, Turkey, Turkey*, 2005.
- [68] S.Cojocar, E.Birsan, G.Batrinca, and P.Arsenie. Gps-glonass-galileo : A dynamical comparison. *The Journal of Navigation*, 62(1) :135–150, 2009.
- [69] H.C.Chen, Y.S.Huang, K.W.Chiang, and M.Yang. The performance comparison between gps and beidou-2/compass : A perspective from asia. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 32(5) :679–689, 2009.
- [70] J.Hightower and G.Boriello. Location systems for ubiquitous computing. *IEEE Computer Society*, 34(8) :57–66, 2001.
- [71] S.Capkun, M.Hamdi, and J.P.Hubaux. Gps-free positioning in ad-hoc networks. In *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI, USA*, pages 3481–3490, 2001.
- [72] S.Capkun, M.Hamdi, and J.P.Hubaux. Gps-free positioning in mobile ad hoc networks. *Cluster Computing*, 5(2) :157–167, 2001.

- [73] R.Iyengar and B.Sikdar. Scalable and distributed gps free positioning for sensor networks. In *Proceedings of IEEE 2003 International Conference on Communications, Anchorage, AK, USA*, pages 338–342, 2003.
- [74] A.A.Ahmed, H.Shi, and Y. Shang. Sharp : a new approach to relative localization in wireless sensor networks. In *25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, Columbus, OH, USA*, 2005.
- [75] L.Wang and Q.Xu. Gps-free localization algorithm for wireless sensor networks. *Sensors*, 10(6) :5899–5926, 2010.
- [76] A.Benslimane. Localization in vehicular ad hoc networks. In *Proceedings of the 2005 Systems Communications (ICW'05), Montreal, Quebec, Canada*, 2005.
- [77] R.Parker and S.Valaee. Vehicle localization in vehicular networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference, Montreal, Que, Canada*, 2006.
- [78] V.Kukshya, H.Krishnan, and C.Kellum. Design of a system solution for relative positioning of vehicles using vehicle-to-vehicle radio communications during gps outages. In *Vehicular Technology Conference, Dallas, TX, USA*, pages 1313–1317, 2005.
- [79] M. Ibrahim and Moselhi. Inertial measurement unit based indoor localization for construction applications. *Automation in Construction*, 71(1) :13–20, 2016.
- [80] M.Coppola, K.N.McGuire, K.Y.W.Scheper, and G.C.H.E. de Croon. On-board communication-based relative localization for collision avoidance in micro air vehicle teams. *Autonomous Robots*, 42(8) :1787–1805, 2018.
- [81] S.Vemprala and S.Saripalli. Vision based collaborative localization for swarms of aerial vehicles. *Annual Forum Proceedings - AHS International*, pages 2980–2985, 2017.
- [82] J.L.Rullán-Lara, S.Salazar, and R.Lozano. Real-time localization of an uav using kalman filter and a wireless sensor network. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 65(1) :283–293, 2012.
- [83] B.R.Stojkoska, J.Palikrushev, K.Trivodaliev, and S.Kalajdziski. Indoor localization of unmanned aerial vehicles based on rssi. In *International Conference on Smart Technologies, Ohrid, Macedonia*, 2017.

- [84] S.Goel, J.Gabela, A.Kealy, and G.Retscher. An indoor-outdoor cooperative localization framework for uavs. In *International Global Navigation Satellite Systems Association, Colombo Theatres, Kensington Campus, UNSW Australia*, 2018.
- [85] U.Nazir, N.Shahid, M.A.Arshad, and S.H.Raza. Classification of localization algorithms for wireless sensor network : A survey. In *International Conference on Open Source Systems and Technologies, Lahore, Pakistan*, 2012.
- [86] G.Han, H.Xu, T.Q.Duong, J.Jiang, and T.Hara. Localization algorithms of wireless sensor networks : a survey. *Telecommunication Systems*, 52(4) :2419–2436, 2013.
- [87] S.HalderEmail and A.Ghosal. A survey on mobile anchor assisted localization techniques in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 22(7) :2317–2336, 2016.
- [88] F.Javed, S.Khan, A.Khan, A.Javed, R.Tariq, Matiullah, and F.Khan. On precise path planning algorithm in wireless sensor network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 4(7) :1–12, 2018.
- [89] G.Han, J.Jiang, C.Zhang, T.Q.Duong, M.Guizani, and G.K.Karagiannidis. A survey on mobile anchor node assisted localization in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 8(3) :2220–2243, 2016.
- [90] A.Paul ans T.Sato. Localization in wireless sensor networks : a survey on algorithms, measurement techniques, applications and challenges. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 6(4) :1–24, 2017.
- [91] Zhang Ming. A mobile anchor-assisted adaptive localization algorithm using anchor-density-based clustering for wireless sensor networks. *Journal of Applied Sciences*, 13(19) :3975–3981, 2013.
- [92] F.Mekelleche and H.Haffaf. Classification and comparison of range-based localization techniques in wireless sensor networks. *Journal of Communications*, 12(4) :221–227, 2017.
- [93] T.Camp, J.Boleng, and V.Davies. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2(5) :483–502, 2002.
- [94] K.SF.su, C. H.Ou, and H.Jiau. Localization with mobile anchor points in wireless sensor networks. *IEEE Transactions Vehicular Technology*, 54(3) :1187–1197, 2005.

- [95] D.Koutsonikolas, S. M.Das, and Y.C.Hu. Path planning of mobile landmarks for localization in wireless sensor networks. *Computer Communication*, 30(13) :2577–2592, 2007.
- [96] J.M.Bahi, A.Makhoul, and A.Mostefaoui. Hilbert mobile beacon for localisation and coverage in sensor networks. *International Journal of Systems Science*, 39(11) :1081–1094, 2008.
- [97] R.Huang and G.V.Zaruba. Static path planning for mobile beacons to localize sensor networks. In *Proceedings of IEEE international conference on pervasive computing and communication. Workshops, White Plains, NY, USA*, pages 323–330, 2007.
- [98] G.Han, H.Xu, J.Jiang, L.Shu, T.Hara, and S.Nishio. Path planning using a mobile anchor node based on trilateration in wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 13(14) :1324–1336, 2011.
- [99] J.Jiang, G. Han, H. Xu, L.Shu, and M. Guizani. Lmat : Localization with a mobile anchor node based on trilateration in wireless sensor networks. In *Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM), Kathmandu, Nepal*, pages 1–6, 2011.
- [100] J.Rezazadeh, M.Moradi, A.S.Ismail, and E.Dutkiewicz. Impact of static trajectories on localization in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 21(3) :809–827, 2015.
- [101] Q.Honghui and J.B.Moore. Direct kalman filtering approach for gps/ins integration. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, 38(2) :687–693, 2002.
- [102] S.Rezaei and R.Sengupta. Kalman filter-based integration of dgps and vehicle sensors for localization. *IEEE transactions on control systems technology*, 15(6) :1080–1088, 2007.
- [103] W.Wang, Z.Liu, and R.Xie. Quadratic extended kalman filter approach for gps/ins integration. *Aerospace Science and Technology*, 10(8) :709—713, 2006.
- [104] Y.Liu, X.Fan, C.Lv, J.Wu, L.Li, and D.Ding. An innovative information fusion method with adaptive kalman filter for integrated ins/gps navigation of autonomous vehicles. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 100 :605–616, 2018.

- [105] K.W.Chiang and Y.W.Huang. An intelligent navigator for seamless ins/gps integrated land vehicle navigation applications. *Applied Soft Computing Journal*, 08(1) :722–733, 2008.
- [106] N.El-Sheimy, K.W.Chiang, and A.Noureldin. The utilization of artificial neural networks for multisensor system integration in navigation and positioning instruments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 55(05) :1606–1615, 2006.
- [107] V.D.Leccel, A.Amato, and V.Piuri. Neural technologies for increasing the gps position accuracy. In *IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems And Applications, Istanbul, Turkey*, pages 4–8, 2008.
- [108] R.Sharaf, A.Noureldin, A.Osman, and N.El-Sheimy. Online ins/gps integration with a radial basis function neural network. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 20(3) :8–14, 2005.
- [109] M.Nguyen-H and C.Zhou. Improving gps/ins integration through neural networks. *Journal of Telecommunications*, 2(2) :1–6, 2010.
- [110] X.Chen, C.Shena, W.Zhang, M.Tomizuka, Y.Xu, and K.Chiuc. Novel hybrid of strong tracking kalman filter and wavelet neural network for gps/ins during gps outages. *SCI Journal*, 46(10) :3847–3854, 2013.
- [111] M.Malleswaran, V.Vaidehi, and M.Mohankumar. A hybrid approach for gps/ins integration using kalman filter and idnn. In *hird International Conference on Advanced Computing (ICoAC), Chennai, India*, pages 378–383, 2011.
- [112] N.Drawil and O.Basir. Intervehicle-communication-assisted localization. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 11(3) :687–691, 2010.
- [113] G.Cybenko. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 2(4) :303–314, 1989.
- [114] R.E.Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(1) :35–45, 1960.
- [115] R.E.Kalman and R.S.Bucy. New results in linear filtering and prediction theory. *Journal of Basic Engineering*, 83(1) :95–108, 1961.

- [116] K.Bader, B.Lussier, and W.Schön. A fault tolerant architecture for data fusion : A real application of kalman filters for mobile robot localization. *Robotics and Autonomous Systems*, 88(1) :11–23, 2017.
- [117] Ali KAZEM. *Particules deterministes generalisees en filtrage non-lineaire : applications defense et telecommunications*. PhD thesis, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [118] Iyad Abuhadrous. *Système embarqué temps réel de localisation et de modélisation 3D par fusion multi-capteur*. PhD thesis, Ecole des Mines de Paris, 2005.
- [119] Youcef Djeriri. Les réseaux neurones artificiels. https://www.academia.edu/37046526/Les_R%C3%A9seaux_de_Neurones_Artificiels, 2017. Online ; accessed May-2019.
- [120] Benoît Virole. *Réseau de neurones et psychométrie*. Editions du Centre de Psychologie Appliquée, 2001.
- [121] Claude Touzet. *Les reseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme : cours, exercices et travaux pratiques*. Collection de l'EERIE, 1992.
- [122] Thomas Laloë. *Sur quelques problèmes d'apprentissage supervisé et non supervisé*. PhD thesis, Université de Montpellier, 2010.
- [123] Karim HADJAR. *Une étude de l'évolutivité des modèles pour la reconnaissance de documents arabes dans un contexte interactif*. PhD thesis, Université de Fribourg (Suisse), 2006.
- [124] Marc Parizeau. Le perceptron multicouche et son algorithme de rétropropagation des erreurs. <https://reussirlem1info.files.wordpress.com/2012/05/mlp.pdf>, 2004. Online ; accessed May-2019.

Filtre de Kalman et ses dérivées

A.1 Filtre de Kalman (Kalman Filter (KF))

Le filtre de Kalman a été développé par Rudolph Kalman [114] pour le cas discret puis repris par Kalman et Bucy [115] pour le cas continu. Est un outil mathématique récursif permettant d'estimer l'état d'un processus. Il est recommandé lorsque l'imprécision sur les données traitées peut être interprétée comme un bruit aléatoire, dont la distribution est connue à priori. Ce filtre permet donc de réaliser la fusion de données imparfaites.

Il est utilisé dans de nombreuses applications dont la fusion de données tels que, le suivi [116] et la localisation d'un objet mobile [101, 102]. Pour les systèmes de localisation, l'état (les coordonnées) d'un objet mobile est estimé à partir de données de capteurs (données de GPS et INS). En supposant connue à priori la distribution des bruits, ce problème d'estimation se ramène à la résolution d'un système d'équations fondés sur deux modèles : le modèle de processus et le modèle de mesure.

Le filtre de Kalman est un estimateur récursif, qui signifie que pour estimer l'état courant, seul l'état précédent et les mesures actuelles sont nécessaires. L'historique des observations et des estimations n'est ainsi pas requis.

Le problème d'estimation dans le filtre Kalman se pose comme suit :

$$X_k = A * X_{k-1} + B * u_k + w_k; w_k \rightsquigarrow \mathfrak{N}(0, Q_k)$$

$$Y_k = H * X_k + v_k; v_k \rightsquigarrow \mathfrak{N}(0, R_k)$$

Où,

- X_k est la position prédit à l'instant k .
- w_k et v_k représentent respectivement le bruit du processus et le bruit de mesure (le bruit de GPS et le bruit de INS), ils sont supposés blancs Gaussiens, centrée et indépendants avec une matrice de variances-covariances Q_k et R_k .
- Les matrices A , B et H sont des matrices de transitions de l'état $K - 1$ à l'état K .

$$A = B = H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- u_k représente les mesure INS (V et θ).
- Y_k représente les observations (données de GPS).

Le filtre de Kalman comporte deux étape distinctes : étape de prédiction et étape de correction. L'étape de prédiction utilise l'état estimé de l'instant précédent pour produire une estimation courante [115]. Dans l'étape de correction, les observations de l'instant courant sont utilisées pour corriger l'état prédit dans le but d'obtenir une estimation plus précise (Voir la figure A.1).

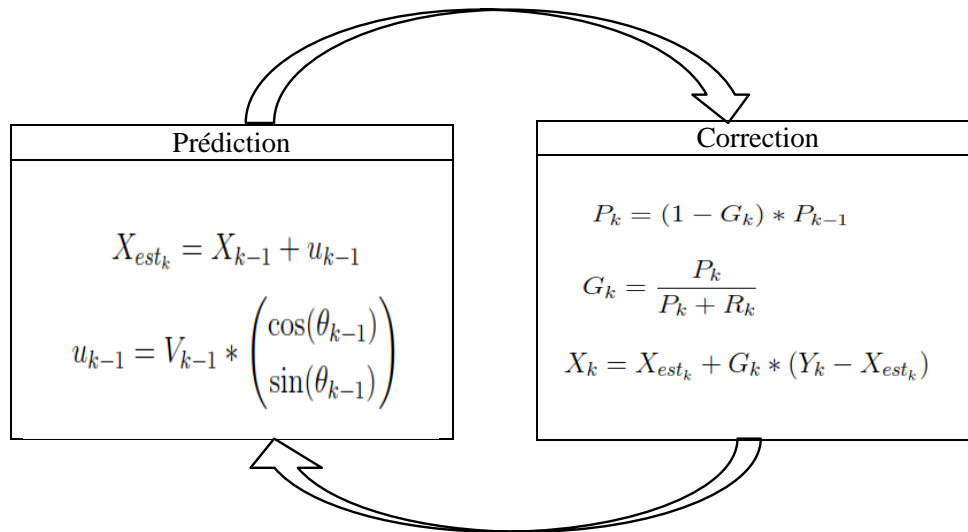


FIGURE A.1 – Principe du filtre de Kalman (KF)

A.1.1 Étape de prédiction

Cette étape utilise l'état estimé de l'instant précédent pour produire une estimation de l'état courant :

$$X_{est_k} = X_{k-1} + u_{k-1}$$

$$u_{k-1} = V_{k-1} * \begin{pmatrix} \cos(\theta_{k-1}) \\ \sin(\theta_{k-1}) \end{pmatrix}$$

A.1.2 Étape de correction

Les observations de l'instant courant sont utilisées pour corriger l'état prédit dans le but d'obtenir une estimation plus précise :

- La matrice de variances-covariances de l'erreur d'estimation P et le gain de Kalman à l'instant k seront calculés comme suit :

$$P_k = P_{k-1} + Q_{k-1}$$

$$G_k = \frac{P_k}{P_k + R_k}$$

- La position estimée X_{est} est corrigée comme suit :

$$X_k = X_{est_k} + G_k * (Y_k - X_{est_k})$$

- La mise à jour de la matrice de l'erreur d'estimation P est donnée par :

$$P_k = (1 - G_k) * P_{k-1}$$

A.1.3 Étape d'initialisation

Pour pouvoir appliquer l'étape de prédiction et de correction constituant le filtre de Kalman, on doit choisir les conditions initiales de l'estimation de vecteur d'état X_0 et de la matrice de covariance de l'erreur P_0 .

Le filtre de Kalman est une méthode d'estimation et de prédiction puissante prenant en compte la modélisation du système. Néanmoins, ce filtre n'est pas forcément l'outil à appliquer dans tous les cas. En effet, le système doit être modélisé assez précisément afin d'obtenir un filtre efficace. Le problème est que certains systèmes sont difficilement modélisables et, encore moins linéaires.

Pour pallier au problème des systèmes non linéaires un filtre de Kalman étendu a été développé et permet de prendre en compte une modélisation non linéaire.

A.2 Filtre de Kalman étendu (Extended Kalman Filter (EKF))

La non-linéarité d'un système peut être associée au modèle du processus, au modèle d'observation ou bien aux deux. Ces non-linéarités rendent le filtre de Kalman inapplicable et il devient donc nécessaire de l'adapter. L'une des approches les plus intuitives consiste à linéariser les fonctions non linéaires à travers un développement de Taylor autour de l'état estimé ; on se trouve alors dans un cas similaire à un filtrage de Kalman linéaire, et la technique obtenue est connue sous l'appellation de filtre de Kalman étendu (EKF).

Le filtre de Kalman étendu a été développé par Stanley F. Schmidt en 1963. Il est identique au filtre de Kalman. La seule différence concerne l'utilisation des matrices d'évolution et de mesure. Dans un filtre de Kalman classique, les matrices (la matrice d'évolution et la matrice de mesure) sont directement issues des équations de mesure et d'état. À l'opposé, dans un filtre de Kalman étendu estimant un processus non linéaire, ce n'est possible d'obtenir directement les matrices d'observation et d'état, il faut qu'on linéarise les fonctions du système localement (autour du point d'estimation courant). On obtient donc les matrices de mesure et de transition en prenant les matrices des dérivés partielles des

équations non linéaires (appelées aussi les matrices jacobienues) [117].

Pour le cas d'un système non linéaire, les équations d'état et de mesure deviennent :

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k, k); \quad w_k \rightsquigarrow \mathcal{N}(0, Q_k)$$

$$Y_k = h(x_k, v_k, k); \quad v_k \rightsquigarrow \mathcal{N}(0, R_k)$$

De la même manière que dans le cas du Filtre de Kalman classique, w_k et v_k sont des bruits blancs, gaussiens, de moyenne nulle et de variances respectives Q et R .

Les fonctions f et h ne sont pas linéaires. Le principe du filtre de Kalman étendu est d'utiliser l'extension en série de Taylor des fonctions non-linéaires et de prendre le premier ordre, en négligeant les ordres supérieurs de la série de Taylor. Il suffit donc de calculer les matrices des dérivés partielles (du premier ordre) des fonctions non linéaires (aussi appelé matrice Jacobienne). Cette dernière est calculée à chaque instant autour du point d'estimation courant \hat{x} avec l'objectif de linéariser le système.

Le principe du filtre de Kalman étendu est résumé dans la figure A.2.

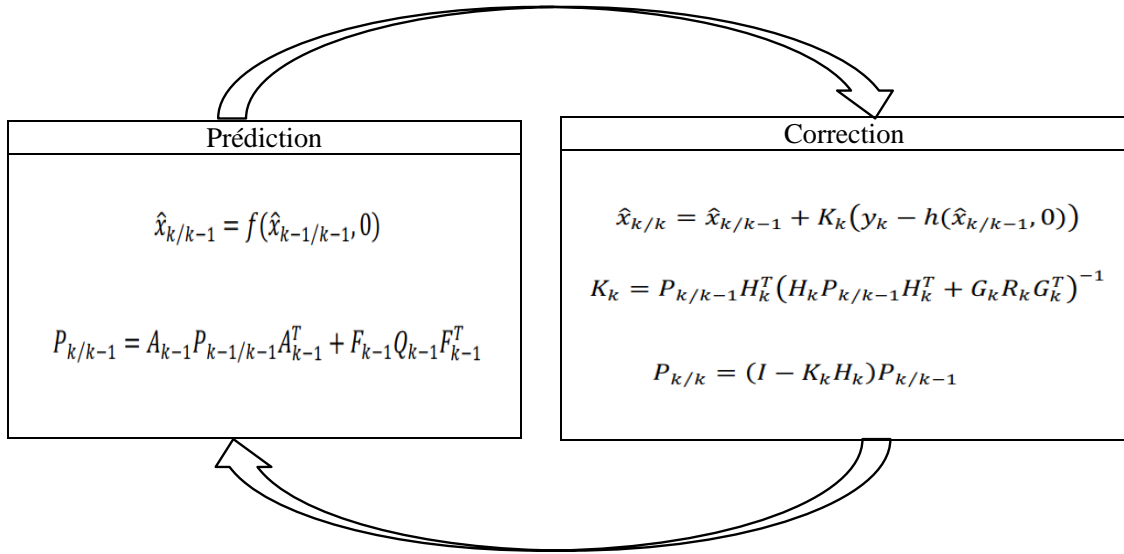


FIGURE A.2 – Principe du filtre de Kalman étendu (EKF)

A.3 Filtre de Kalman inodore (Unscented Kalman Filter (UKF))

Les termes négligés dans la linéarisation du filtre de Kalman étendu peuvent être relativement grands ce qui peut présenter de grandes erreurs dans l'estimation de la moyenne et de la covariance a posteriori. Ceci peut mener à une performance sub-optimale et parfois à la divergence du filtre [118].

Pour pallier au problème du filtre de Kalman étendu, un autre estimateur de système non-linéaire, appelé Unscented Kalman Filter (UKF) a été développé par Julier et Uhlmann. Il est basé sur le principe qu'un ensemble de points échantillons d'une densité peut être utilisé pour paramétrer l'équation d'une moyenne et covariance. L'estimateur assure une performance équivalente au KF pour les systèmes linéaires et s'applique localement d'une manière élégante aux non-linéarités sans passer par les étapes de linéarisation exigées par l'EKF. L'UKF résout les problèmes liés à l'EKF en utilisant une approche d'échantillonnage déterministe. La distribution est représentée par un ensemble localement minimal de points. Ces points sont représentatifs jusqu'au troisième ordre d'un développement de Taylor. La densité conditionnelle est caractérisée par un ensemble de $(2n+1)$ points soigneusement choisis (sigma points), où n est la dimension de l'espace d'état. Ils sont propagés grâce à l'équation dynamique non-linéaire du système. Ils permettent d'évaluer précisément la moyenne et la matrice de covariance de l'état prédit (avec une précision d'ordre 3 de Taylor) [117].

B.1 Introduction

Les techniques de l'intelligence artificielle telles que les systèmes experts, la logique floue, les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été largement utilisées dans le domaine de l'électronique de puissance et de la commande des machines électriques. L'objectif recherché dans l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle est d'arriver à l'émulation du raisonnement humain sur un processeur de signal numérique de telle sorte que le système complet commande-machine puisse penser et réagir intelligemment comme un être humain [119].

Parmi toutes les techniques intelligentes, les réseaux de neurones artificiels semble avoir le maximum d'impact dans le domaine de l'électronique de puissance et dans la commande de machines électriques. Ils constituent une technique de traitement de données bien comprise et bien maîtrisée. Ces techniques s'intègrent parfaitement dans les stratégies de commande. En effet, elles réalisent des fonctionnalités d'identification, de contrôle ou de filtrage, et prolonge les techniques classiques de l'automatique non linéaire pour aboutir à des solutions plus efficaces et robustes [120].

Les réseaux de neurones artificiels consistent en des modèles plus ou moins inspirés du fonctionnement cérébral de l'être humain en se basant principalement sur le concept de neurone biologique.

B.2 Définitions

Un réseau de neurones artificiel est un ensemble de neurones formels interconnectés entre eux dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement de vrais neurones biologiques (Voir la figure B.1). Dans un réseau de neurones est un ensemble

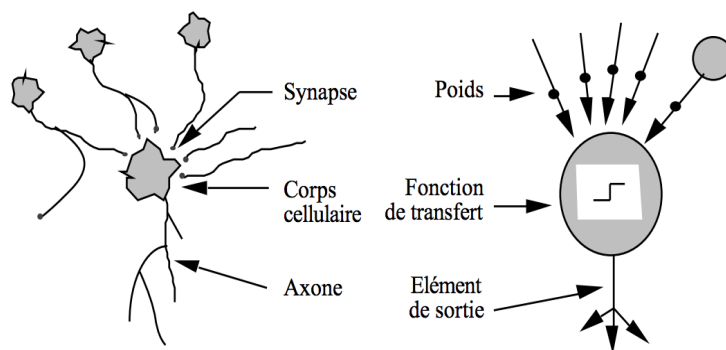


FIGURE B.1 – Neurone biologique/Neurone formel

de neurones, chaque neurone fonctionne indépendamment des autres de telle sorte que l'ensemble forme un système massivement parallèle. L'information est stockée de manière distribuée dans le réseau sous forme de coefficients synaptiques ou de fonctions d'activation. Un réseau de neurone ne se programme pas, il est entraîné grâce à un mécanisme d'apprentissage.

B.2.1 Neurone formel

Le neurone formel est une modélisation mathématique qui reprend les principes du fonctionnement du neurone biologique, en particulier la sommation des entrées. Sachant qu'au niveau biologique, les synapses n'ont pas toutes la même valeur (les connexions entre les neurones étant plus ou moins fortes).

Le neurone formel (Voir la figure B.2) reçoit un ensemble de signaux d'entrées x_i et fournit un signal de sortie s . Ces signaux sont pondérés par des poids w_i . Il est à noter que x_i et w_i sont représentés sous forme de vecteur. Chaque neurone formel calcule son potentiel $p = \sum(w_i * x_i)$, ensuite le signal de sortie du neurone (ou activation) $s = f(p)$ est calculée en invoquant une fonction de transfert (une fonction seuil) f qui est appliquée sur le potentiel calculé.

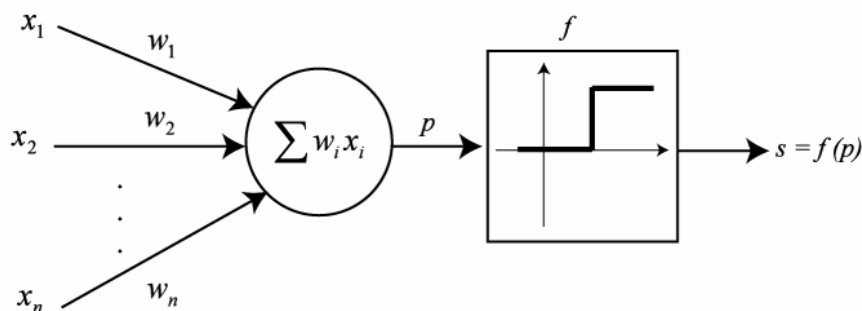


FIGURE B.2 – Neurone formel

B.2.2 Fonction d'activation

La fonction d'activation (ou fonction de seuillage, ou encore fonction de transfert) sert à introduire une non linéarité dans le fonctionnement du neurone. Les fonctions de transfert présentent généralement trois intervalles :

- en dessous du seuil, le neurone est non actif (dans ce cas, sa sortie vaut 0 ou -1).
- aux alentours du seuil, une phase de transition.
- au dessus du seuil, le neurone est actif (dans ce cas, sa sortie vaut 1).

Les fonctions d'activations les plus utilisées sont les fonctions seuil (en anglais «hard limit»), linéaire et sigmoïde (Voir la figure B.3).

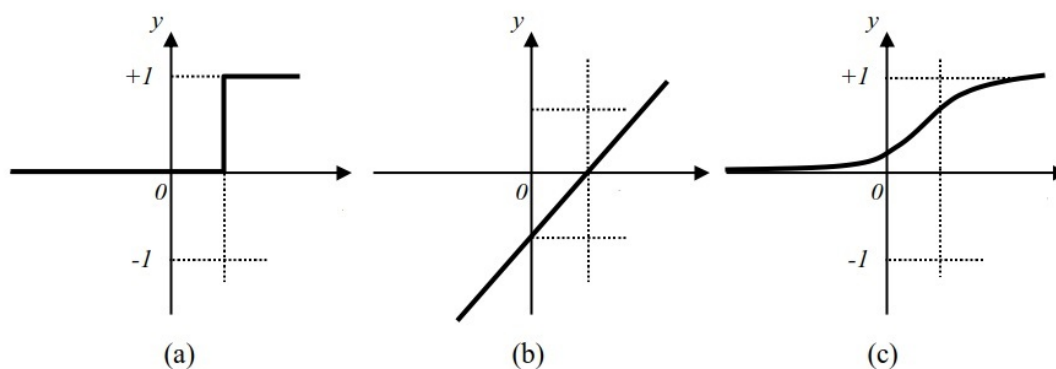


FIGURE B.3 – Fonctions d'activations : (a) seuil, (b) linéaire et (c) sigmoïde

- Dans le cas du neurone seuil, le fonctionnement de la fonction de transfert est le suivant : si le potentiel est supérieur à un seuil θ alors la sortie du neurone est égale à 1, sinon elle égale à 0.

$$\begin{cases} s = 1, & \text{si } p > \theta \\ s = 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

- La fonction linéaire est très simple, elle affecte directement son entrée à sa sortie :

$$s = p$$

- La fonction de transfert sigmoïde est définie par :

$$s = \frac{1}{1 + e^{-p}}$$

B.3 Architecture des réseaux de neurones

L'architecture d'un réseau de neurones est l'organisation des neurones entre eux au sein d'un même réseau. Autrement dit, il s'agit de la façon dont ils ordonnés et connectés. On distingue deux grands types d'architectures de réseaux de neurones : les réseaux de neurones non bouclés et les réseaux de neurones bouclés.

B.3.1 Réseaux de neurones non bouclés

Un réseau de neurones est non bouclé, ou statique, si son graphe ne possède pas de cycle. Il réalise donc, de manière générale, une relation algébrique non linéaire entre ses entrées et ses sorties. C'est à dire qu'il est obligatoire de représenter un réseau graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux et que l'information circule des entrées vers les sorties sans retour (un seul sens), c'est à dire que la sortie courante n'a aucune influence sur les entrées futures [119].

On peut dire que l'utilisation dominante des réseaux non bouclés est l'organisation des réseaux en plusieurs couches de neurones appelés réseaux multicouches ou perceptron multicouches. Un réseau multicouche comporte une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées, et une couche de sortie. Dans un tel réseau, la sortie de chaque neurone de la couche (L) est reliée à l'entrée de chaque neurone de la couche (L+1).

La figure B.4 représente un réseau de neurones non bouclé qui a une structure particulière, très fréquemment utilisée : il comprend des entrées, deux couches de neurones

cachés et des neurones de sortie. Les neurones de la couche cachée ne sont pas connectés entre eux. Cette structure est appelée Perceptron multicouches.

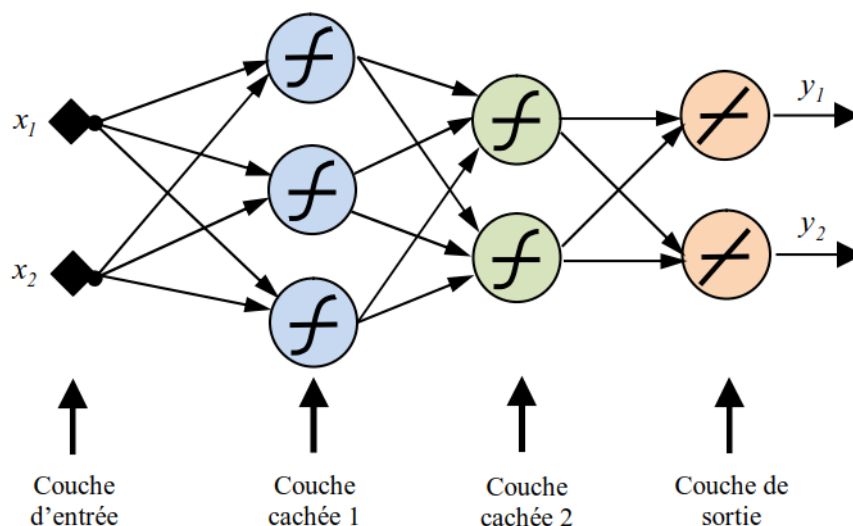


FIGURE B.4 – Réseau de neurones non bouclé (Perceptron multicouches)

On note aussi que Les réseaux multicouches sont beaucoup plus puissants que les réseaux simples à une seule couche. En utilisant deux couches (une couche cachée et une couche de sortie), à condition d'utiliser une fonction d'activation sigmoïde sur la couche cachée, on peut entraîner un réseau à produire une approximation de la plupart des fonctions, avec une précision arbitraire citeCybenko1989.

B.3.2 Réseaux de neurones bouclés

Contrairement aux réseaux de neurones non bouclés dont le graphe de connexions est acyclique, les réseaux de neurones bouclés peuvent avoir une topologie de connexions quelconque, comprenant notamment des boucles qui ramènent aux entrées la valeur d'une ou plusieurs sorties (Voir la figure B.5). Il s'agit donc de réseaux de neurones avec retour en arrière (feedback network or recurrent network) [119].

Parmi les architectures de cette classe, nous trouvons le réseau de neurones à mémoires (MNN) et le réseau neuronale récurrent à temps discret (DTRNN).

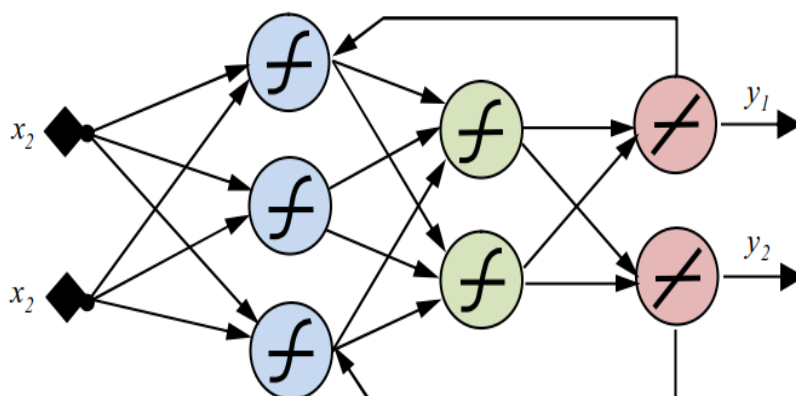


FIGURE B.5 – Réseau de neurones bouclé

B.4 Traitement de l'information par réseau de neurones

Le traitement de l'information par réseau de neurones est exécuté en deux phases : phase d'apprentissage et phase de généralisation.

B.4.1 Phase d'apprentissage

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement [121]. Tout simplement, l'apprentissage est la modification des poids du réseau.

L'apprentissage se fait en cinq étapes, ces étapes sont répétées jusqu'à la fin d'apprentissage :

- Étape 1 : Initialisation des poids du réseau à des petites valeurs aléatoires.
- Étape 2 : Présentation d'une entrée de la base d'apprentissage.
- Étape 3 : Calcul de la sortie obtenue pour cette entrée.
- Étape 4 : Si la sortie est différente de la sortie désirée alors modification des poids.
- Étape 5 : Retour à l'étape 2.

On distingue deux types d'apprentissage : supervisé et non supervisé [122]. Cette distinction repose sur la forme des bases d'apprentissage.

- **Apprentissage supervisé** : Dans cette classe, la base d'apprentissage est un ensemble des couples (Entrées, sorties désirées), Le réseau effectue une évaluation de la donnée, puis compare la valeur obtenue avec sortie désirée, il va ensuite modifier ses paramètres internes (poids) afin de minimiser l'erreur constatée. Le réseau va se modifier jusqu'à ce qu'il trouve la bonne sortie.
- **Apprentissage non supervisé** : Pour cette classe, on ne dispose que les valeurs (Entrées), l'apprentissage consiste à les regrouper selon des critères de ressemblance qui sont inconnus à priori, Ce type est très utilisé dans les problèmes de classification [123].

Pour ces deux types d'apprentissage, il y a également un choix traditionnel entre :

- Apprentissage hors-ligne : Toutes les données sont dans une base d'exemples d'apprentissage qui sont traités simultanément.
- Apprentissage en-ligne : Les exemples sont présentés les uns après les autres au fur et à mesure de leur disponibilité.

B.4.2 Phase de généralisation

Appelée aussi phase de reconnaissance, elle concerne la tâche accomplie par le réseau une fois son apprentissage est achevé. Elle est évaluée en testant le réseau sur des données qui n'ont pas servi à l'apprentissage. Elle est influencée essentiellement par quatre facteurs [119] :

- La complexité du problème (sa nature) ;
- L'algorithme d'apprentissage (son aptitude à trouver un minimum local assez profond, sinon le minimum global) ;
- La complexité de l'échantillon (le nombre d'exemples et la manière dont ils représentent le problème ;
- La complexité du réseau (nombre de poids).

B.5 Algorithme de la rétro-propagation du gradient d'erreur

L'un des algorithmes les plus répandus est celui de la rétro-propagation ou back-propagation. Cet algorithme change les poids à chaque fois qu'un exemple d'apprentissage

est présenté. Ce changement est fait de telle sorte à minimiser l'erreur entre la sortie désirée et la réponse du réseau.

L'algorithme de rétro-propagation du gradient comporte donc deux phases [124] :

- Propagation : à chaque itération, un élément de l'ensemble d'apprentissage est introduit à travers la couche d'entrée. L'évaluation des sorties du réseau se fait couche par couche, de l'entrée vers la sortie.
- Rétro-propagation : cette étape est similaire à la précédente. Cependant, les calculs s'effectuent dans le sens inverse (de la sortie vers l'entrée). À la sortie du réseau, on calcule une erreur (en général la somme quadratique moyenne des erreurs pour tous les neurones de sortie) que l'on rétro-propage dans le réseau. Ce processus est interrompu dès que l'erreur globale estimée est suffisante.

La figure B.6 montre les étapes d'apprentissage des réseaux de neurones par l'algorithme de rétro-propagation [119].

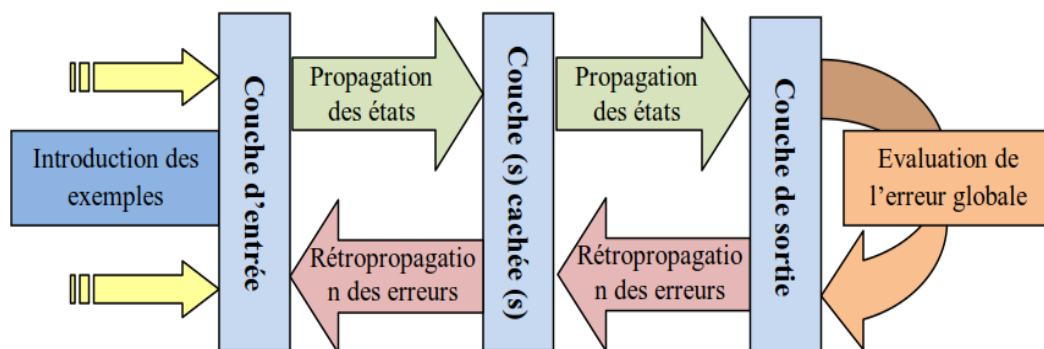


FIGURE B.6 – Étapes d'apprentissage par l'algorithme de rétro-propagation

B.5.1 Présentation de l'algorithme

Le principe de cet algorithme est que à chaque fois qu'un exemple $y_i = f(x_i)$ est présenté, les poids doivent être changés. Ce changement est fait pour minimiser l'erreur entre la sortie désirée (d_i) et la réponse du réseau (y_i) à une entrée (x_i). Pour cela, à chaque itération le signal d'entrée se propage dans le réseau dans le sens entrée-sortie, une sortie est ainsi obtenue, l'erreur entre cette sortie et la sortie désirée est calculée. Puis, par

rétro-propagation, des erreurs intermédiaires correspondant à la couche cachée sont ainsi calculées et permettent l'ajustement des poids $w_{ij}(t)$ de la couche cachée [119].

Pour réaliser l'apprentissage d'un réseau de neurones multicouche, on utilise la règle d'apprentissage du delta généralisé pour chaque neurone i :

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_j(t)x_i$$

Où,

- $\delta_j(t)$ est l'erreur faite par le neurone j .
- $\alpha(t)$ est le pas de modification des poids.

La figure B.7 montre l'algorithme de rétro-propagation avec un réseau de neurones a deux entrées, une couche cachée de trois neurones et une couche de sortie de deux neurones [119].

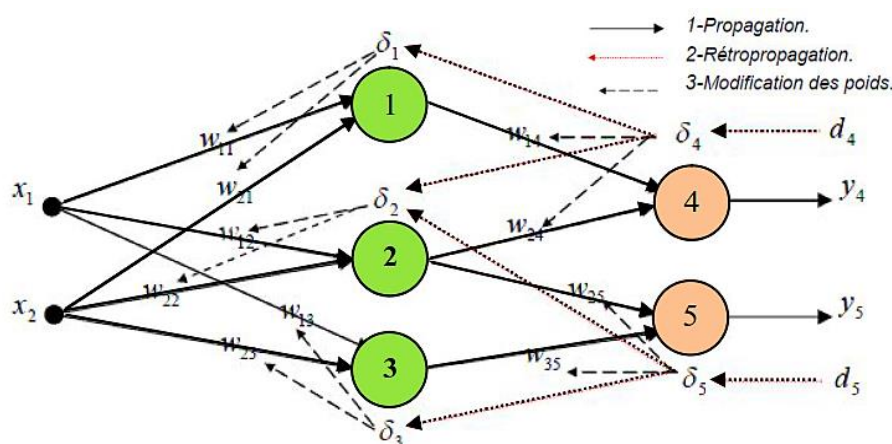


FIGURE B.7 – Algorithme de rétro-propagation

Pour pouvoir modifier les poids synaptiques reliant la couche d'entrée à la couche cachée (w_{11}, w_{12}, w_{13} et w_{21}, w_{22}, w_{23}), il faut connaître les sorties désirées d_1, d_2 et d_3 et les erreurs δ_1, δ_2 et δ_3 que font les neurones 1, 2 et 3 et qui permettent d'appliquer la règle du delta généralisé. L'idée consiste alors à propager les erreurs δ_4 et δ_5 vers les neurones 1, 2 et 3, au travers des poids w_{14}, w_{24}, w_{25} et w_{35} .