

Université de Montréal

Localisation des nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil

par

Boushaba Mustapha

Département d'informatique et de recherche opérationnelle

Faculté des arts et des sciences

11805287

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures

en vue de l'obtention du grade de

Maîtrise ès sciences (M.Sc.)

en Informatique

Avril, 2007

© Boushaba Mustapha, 2007



QA

76

U54

2007

v. 008

AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

Localisation des nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil

présenté par :
Boushaba Mustapha

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Houari Sahraoui, président
Abdelhakim Hafid, directeur de recherche
Abderrahim Benslimane, codirecteur de recherche
Mostapha Aboulhamid, membre du jury

Mémoire accepté le 15 juillet 2007

Résumé

La miniaturisation des composants électroniques a récemment permis de fabriquer des systèmes de petite taille dotés d'un microprocesseur, d'une mémoire, d'une capacité de communication et de senseurs. Ces systèmes sont appelés nœuds de capteurs. Lors de leur déploiement dans un environnement, ils interagissent d'une façon autonome et sans fil formant ainsi un réseau de capteurs capable d'acheminer des informations depuis une source vers une station de base. Les réseaux de capteurs sont utilisés dans de nombreuses applications comme la détection des mines, le contrôle de l'environnement ou encore la gestion du trafic routier, etc.

Toutes ces applications nécessitent de connaître la position des nœuds pour traiter l'évènement. Bien entendu, la solution évidente visant à équiper tous les nœuds d'un module GPS est extrêmement coûteuse et est soumise à de nombreuses contraintes (plus d'énergie consommée, les GPS ne fonctionnent pas à l'intérieur des bâtiments). De plus, le calcul de la position des nœuds est le plus souvent influencé par les erreurs de mesures. Ces erreurs dépendent de la nature des milieux environnementaux où les capteurs sont déployés. Par ailleurs, des erreurs dans les distances et les angles estimés entre chaque paire de nœuds peuvent engendrer des erreurs de positionnement. Ces dernières peuvent être propagées à travers le réseau et ainsi devenir cumulatives.

Vu l'importance pratique de ces problèmes, plusieurs techniques ont été proposées dans la littérature pour y remédier. Certaines d'entre elles utilisent une fraction des nœuds comme ancres (équipées de GPS) afin de permettre à d'autres nœuds de déterminer leurs positions. Ces approches présentent cependant certains inconvénients. En effet, quelques approches localisent moins de nœuds dans les réseaux, d'autres nécessitent une forte densité d'ancres ou un grand degré de connectivité et certaines localisent plus de nœuds mais avec une grande marge d'erreurs entre les positions estimées et les positions réelles.

Nos travaux de recherche tentent à pallier aux déficiences énumérées ci-dessus. Ils reposent d'une part sur l'utilisation des distances, des angles d'arrivée et des ancrés pour estimer la position des nœuds et d'autre part sur un mécanisme de contrôle d'erreur permettant de localiser avec plus de précision les nœuds et de réduire la propagation et l'accumulation des erreurs à travers le réseau.

Mots-clés : Angles d'arrivée, Erreurs de mesures, Localisation, Réseaux de capteurs, Trilatération, Triangulation, GPS

Abstract

The electronic miniaturization of components enables the manufacturing of tiny systems equipped with microprocessor, memory, capacity of communication and sensors. These systems known as sensors nodes, self interact to form a network without requiring an established infrastructure. In these networks, nodes are capable of sensing their environments and sending collected information to one or more base stations through wireless links. Sensors networks are used by many applications, including environmental areas, traffic control, and military operations such as detection of mines.

Most of sensor-based applications require the knowledge of the positions of sensors for processing the collected information. Equipping all the nodes with a GPS is extremely expensive in terms of dollars and power consumption; moreover GPS is not appropriate inside buildings. The estimation of a node's position most often includes errors due to the measurements of distance and incoming angles between neighbors. These errors vary with the nature of the environment where the sensors are deployed. These positioning errors can be propagated through the network and thus become cumulative.

Several localization techniques have been proposed in the open literature. Techniques of interest use a fraction of the nodes as landmarks (equipped with GPS) to help others nodes to be localized. More often, these techniques require high number of landmarks and/or big node degree; they also fail to locate a high percentage of non-positioned nodes with good accuracy (i.e., computed position Vs. real position).

In this project, we propose new techniques to locate nodes in sensors networks; our techniques requires a smaller number of landmarks, locates more non-positioned nodes with better accuracy than existing approaches.

Keywords : Angle of Arrival, Errors Measurement, Localization, Sensor Networks, Trilateration, Triangulation, GPS

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	v
Table des matières.....	vi
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures.....	x
Liste des sigles et des abréviations.....	xii
Accord des coauteurs.....	xiii
Dédicace.....	xiv
Remerciements.....	xv
Chapitre 1.....	1
Introduction.....	1
1.1 Les réseaux de capteurs.....	1
1.2 Motivation.....	3
1.3 Description des problèmes de la localisation.....	5
1.4 Contributions.....	6
1.5 Organisation du mémoire.....	7
Chapitre 2.....	9
Revue de littérature.....	9
2.1 Techniques de mesure des distances.....	9
2.1.1 Heure d'arrivée TOA.....	10
2.1.2 Différence de Temps d'arrivée.....	10
2.1.3 Angle d'arrivée AoA.....	12
2.1.4 Force du signal RSSI.....	12
2.2 Les erreurs de mesures.....	13
2.3 Techniques d'estimation des coordonnées.....	15
2.3.1 La triangulation.....	16
2.3.2 La trilatération.....	17

2.3.3 La multilatération	18
2.4 Techniques de déploiement des nœuds	19
2.5 Les algorithmes existants de localisation des nœuds	22
2.5.1 Approches distribuées	24
2.5.1.1 APS (Ad-Hoc Positioning System).....	24
2.5.1.2 AHLoS (Ad-Hoc Localization System).....	28
2.5.1.3 APIT (Approximate Point In Triangulation).....	31
2.5.2 Approches centralisées.....	33
2.6 Conclusion	34
Chapitre 3	36
Localisation des nœuds de capteurs dans un milieu exempt d'erreurs	36
Mise en contexte	36
A2L: Angle to Landmarks Based Method Positioning for Wireless Sensor Networks...	37
Abstract	37
I. INTRODUCTION	37
II. Related work.....	39
III. Angle to Landmark Algorithm.....	41
A. Message exchanges by A2L nodes	44
B. A2L algorithm	45
IV. Experimental results.....	48
V. Conclusion.....	56
References	57
Chapitre 4	59
Localisation des nœuds de capteurs dans un milieu avec erreurs	59
Mise en contexte	59
HA-A2L: Angle to Landmark-based High Accuracy localization method in Sensor Networks	60
Abstract	60

I. INTRODUCTION	60
II. Related work.....	63
III. HA-A2L	65
A. Network Model	65
B. Error Model	66
C. HA-A2L Localization Algorithm	67
IV. SIMULATION.....	74
V. CONCLUSION	80
References	80
Chapitre 5	82
Conclusion et perspectives	82
5.1. Conclusion	82
5.2. Perspectives.....	83

Liste des tableaux

Tableau 1. Énergie consommé par un nœud de capteur Mica II	2
Tableau 2. Aperçu des propriétés d'un ensemble représentatif des méthodes distribuées	35

Liste des figures

Chapitre 1

Fig. 1 Composants d'un nœud de Capteur Mica II	1
--	---

Chapitre 2

Fig.1 Illustration du Principe TDOA	11
Fig.2 Nœud Medusa	12
Fig.3 Loi normale	14
Fig.4 Propriétés d'une distribution normale	15
Fig.5 Principe de la localisation à l'aide des ancrs	16
Fig.6 Illustration du principe de la triangulation	17
Fig.7 Illustration du principe de la trilatération	18
Fig.8 Illustration du principe de la multilatération	19
Fig.9 Exemples de disposition des ancrs	20
Fig.10 Techniques de placement des ancrs	22
Fig.11 DV-hop	25
Fig.12 DV-euclidean	27
Fig.13 Principe d'une multilatération atomique et itérative	29
Fig.14 Cas ambigu pour une multilatération atomique ou itérative	30
Fig.15 Estimation de la position d'un nœud par APIT	31
Fig.16 PIT test sur l'existence d'un nœud à l'intérieur d'un triangle	32
Fig.17 Cas d'erreurs observé chez APIT	32

Chapitre 3

Fig.1 Sample topology: 5 nodes with 3 landmarks	41
Fig.2 Localization nodes using A2L algorithm	42
Fig.3 Neighbors table structure	45
Fig.4 Landmarks table structure	46
Fig.5 A2L vs APS Coverage in different node degree (4,2, 6,14, 10,27)	49

Fig.6 localized nodes rate vs landmarks in 300 nodes network	50
Fig.7 Required landmarks for localization in networks with different sizes in as square area 100x100	51
Fig.8 Traffic vs size with 10% and 20% Landmarks	52
Fig.9 Average energy vs network size with 10% and 20% Landmarks	52
Fig.10 Traffic vs Landmarks in 200-nodes network	53
Fig.11 Traffic vs TTL vs localized nodes in 200-nodes network with 10% Landmarks	54
Fig.12 Accuracy measurement in 100 nodes networks	56
Chapitre 4	
Fig.1 \hat{d}_{MIN} and \hat{d}_{MAX} separating Landmark at two hops	69
Fig.2 Confidence zone	70
Fig.3 Standard deviation vs. mean error	75
Fig.4 Coverage vs Landmarks	76
Fig.5 Mean errors vs Landmarks	77
Fig.6 Coverage vs. network size	78
Fig.7 Mean error vs network size	78
Fig.8 Accuracy measurement under different algorithms	79

Liste des sigles et des abréviations

Acronyme	Description
A2L	Angle to Landmark
AHLoS	Ad-Hoc Localization System
AOA	Angle of Arrival
APIT	Approximate Point In Triangulation
APS	Ad-Hoc Positioning System
GPS	Global Positioning System
HA-A2L	High Accuracy A2L
MDS-MAP	Multidimensional Scaling-Map
RF	Radiofréquence
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SDP	Semidefinite Programming
STROBE	Selectively Turning Off BEacons
TDOA	Time Difference Of Arrival
TOA	Time of Arrival
TTL	Time To Live

1. Identification de l'étudiant

Nom et prénom : Boushaba Mustapha

Sigle et titre du programme : (2-175-1-0) Maîtrise ès sciences en informatique

2. Description des articles intégrés dans ce mémoire

Article 1

Mustapha Boushaba, Abderrahim Benslimane and Abdelhakim Hafid, A2L: Angle to Landmarks Based Method Positioning for Wireless Sensor Networks, IEEE ICC, Glasgow, 2007 (accepté pour publication)

Article 2

M. Boushaba, A. Hafid and A. Benslimane, HA-A2L: Angle to Landmark-based High Accuracy localization method in Sensor Networks, ACM IWCMC, Honolulu, Hawaii, 2007 (article soumis)

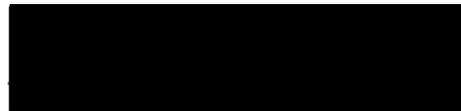
3. Contributions

Dans ces deux articles, ma contribution a été la suivante :

- Proposition de deux algorithmes de localisation des nœuds de capteurs
- Implémentation de ces deux algorithmes puis comparaison et analyse des résultats avec d'autres techniques de la localisation
- Rédaction des deux articles

4. Déclaration de tous les coauteurs autres que l'étudiant

Par leurs signatures, chaque co-auteur des publications mentionnées en haut, accorde sa permission explicite pour que les articles soient inclus dans le présent mémoire. Ces articles seront formatés pour répondre aux exigences de l'université. Aussi, ils attestent que les contributions aux articles sont effectivement telles que décrites dans ce mémoire



Abdelhakim Hafid



Abderrahim Benslimane

À mes parents.

À mon épouse.

À mes enfants.

À toute ma famille.

À toute ma belle-famille

Remerciements

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements et ma gratitude à mon directeur et mon codirecteur de recherche, les professeurs Abdelhakim Hafid et Abderrahim Benslimane pour leur patience, leur disponibilité, leur aide et leur support tout au long de ce travail.

J'aimerais remercier ma femme Soumia pour sa présence et son soutien permanents ainsi que mes enfants Aymane et Ayah pour leur patience et leur sagesse.

Enfin, que tous celles et ceux qui m'ont apporté leur appui trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements

Chapitre 1

Introduction

1.1 Les réseaux de capteurs

De nos jours, grâce à la technologie avancée et plus particulièrement à l'évolution de la microélectronique et de la communication sans fil, les réseaux de capteurs ont connu un essor considérable. Généralement, ces réseaux se composent d'un grand nombre de nœuds (capteurs) capables de mesurer des phénomènes, d'effectuer des calculs et de communiquer les uns aux autres à travers une transmission multi-sauts sans fil. Ces nœuds remplissent deux rôles essentiels : le recensement et la transmission de l'information au reste du réseau. Les composantes principales d'un nœud de capteur typique incluent une antenne et une radiofréquence (RF), un émetteur-récepteur pour permettre la communication avec d'autres nœuds, une unité de mémoire, un CPU, un ou des capteurs (de lumière, de température, de pression barométrique, d'accélération sismique, d'acoustique, ...) et un interrupteur contrôlant l'alimentation assurée par des batteries. Ils fonctionnent à faible puissance et communiquent entre eux au moyen de connexions sans fil de courtes distances pour former ainsi un réseau autonome sans infrastructure : le réseau ad hoc. Ils se caractérisent également par leur petite taille et leur faible prix. La figure 1 suivante, extraite de la source [37], est une illustration des composants d'un nœud de capteur.

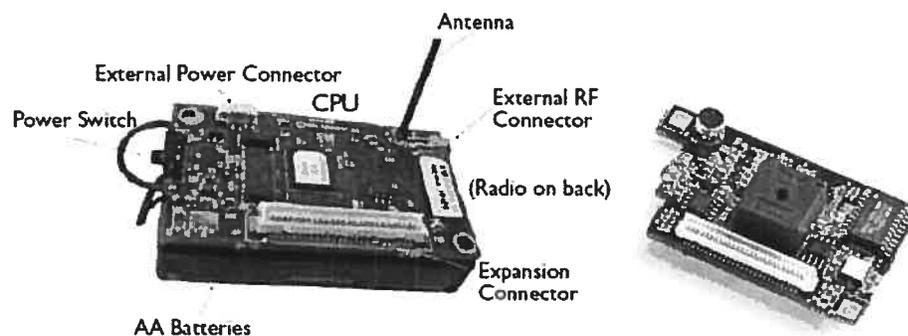


Figure 1. Composants d'un nœud de Capteur Mica II.

A gauche, un processeur et radio de transmission. A droite, un capteur d'évènements

Compte tenu de l'aspect miniature des nœuds de capteurs et des calculs et transmissions de données qu'ils sont censés effectuer, ils ne peuvent pas être dotés d'une grande autonomie. Les batteries s'épuisent rapidement. Le problème est d'autant plus critique quand le nombre de voisins d'un nœud est grand. Ceci augmente le trafic qui circule dans le réseau et engendre plus de traitement et de calcul. Dans ce contexte l'épuisement de la batterie entraînera la mort du capteur et la durée de vie du réseau diminuera au fur et à mesure. Par exemple, un nœud de capteur opérant à un 100% de cycle de service ne dure que 7 jours [27]. Le tableau 1 suivant, extrait de la source [27], nous donne une idée sur l'énergie consommée par un nœud de capteur Mica durant ces différentes phases : capture, traitement, transmission, réception et mode sommeil.

Opération	nAh (nano Ampere hour)
Transmission d'un paquet de 30-octets	20.000
Réception d'un paquet de 30-octets	8.000
1 simple opération de capteur (analogique)	1.080
1 ms d'écoute radio	1.250
Lecture mémoire	1.111
Écriture/suppression de 4 octets en mémoire	83.333

Tableau 1. Énergie consommée par un nœud de capteur Mica II

Nous remarquons ainsi que deux éléments sont plus consommateurs d'énergie que les autres : l'écriture et la suppression de données ainsi que la transmission radio.

Typiquement, un réseau de capteurs se caractérise par le déploiement de plusieurs nœuds de façon aléatoire dans différentes régions, même celles à accès difficile. Le plus souvent, les données collectées par les capteurs sont transmises vers des stations de base pour qu'elles soient traitées. Durant les vingt dernières années, les applications fonctionnant avec ces dispositifs en réseau sont devenues extrêmement répandues. Elles

balayent un large spectre de domaines incluant la robotique, la détection des mines, le dépistage des objets, le contrôle de l'environnement, la détection des feux de forêts, la gestion du trafic routier, le suivi et le contrôle de la santé des patients dans le domaine médical, pour ne citer que quelques uns d'entre eux.

Ces applications partagent toutes une caractéristique commune : la position du capteur. Étant donné que la tâche principale d'un réseau de capteurs est la détection et la diffusion des informations, il faut connaître non seulement l'événement capturé mais également l'endroit précis de son déroulement. En outre, dans n'importe quel réseau de capteurs sans fil, localiser l'origine de l'information reçue par une station de base joue un rôle vital dans la compréhension du contexte d'une application. Pour illustrer nos propos, considérons une application de contrôle et de détection de feu de forêt. Détecter à partir d'une station de base distante qu'il y a un feu de forêt est une bonne chose, mais connaître l'endroit précis où ce feu s'est produit s'avère encore meilleur.

1.2 Motivation

Par définition, la localisation des nœuds dans un réseau de capteurs consiste à déterminer les positions des nœuds d'une façon autonome sans utiliser une infrastructure fixe. Trois principales raisons justifient le besoin d'une telle localisation :

- La connaissance des coordonnées d'un capteur est nécessaire pour les applications qui se basent principalement sur la détection et le report des événements [13]. Ces applications ont besoin de savoir exactement la position où l'événement s'est produit. L'exemple de la localisation des mines et de la détection d'intrus dans un champ de bataille pour le cas d'une application militaire ainsi que l'exemple de détection d'incendie mentionné plus haut, en est une bonne illustration;

- la localisation est aussi nécessaire pour les applications de proximité [35]. Celles-ci permettent à différents usagers physiquement proches les uns des autres de partager certaines de leurs informations et de localiser les données disponibles;
- la troisième raison réside dans le fait de permettre la gestion de certaines fonctionnalités spécifiques au réseau de capteurs. À titre d'exemple, certaines applications basées sur le routage géographique [18] nécessitent de connaître les nouvelles coordonnées d'un nœud susceptible d'être en mouvement. Ces coordonnées vont pouvoir aider les applications à retracer la nouvelle route depuis une station source vers un nœud de capteur destinataire.

Au vu de l'importance de la localisation des nœuds dans un réseau de capteurs, plusieurs travaux ont été proposés. Quelques solutions plus naïves à ce problème consistent soit à indiquer statiquement les positions des nœuds (en les configurant manuellement), soit à les positionner dans des endroits précis dont les coordonnées sont connues ou bien les équiper chacun par des GPS (Global Positioning System) afin qu'ils reçoivent en temps réel leurs coordonnées. On voit bien que ces solutions vont à l'encontre des caractéristiques d'un réseau de capteurs :

- Compte tenu de l'aspect ad hoc de ces réseaux, le déploiement des nœuds dans une zone doit être effectué d'une façon aléatoire;
- les réseaux de capteurs doivent être à faible coût. Or, la solution d'équiper chaque nœud par un GPS serait extrêmement coûteuse ;
- la localisation des nœuds reste aussi valable pour l'extérieur que pour l'intérieur des bâtiments. Or, l'utilisation des systèmes de GPS a comme inconvénient de ne pas fonctionner à l'intérieur des bâtiments;

- la durée de vie d'un réseau dépend de la durée de vie des batteries. Ces dernières sont les sources d'alimentation pour les capteurs. Ainsi, l'énergie nécessaire au fonctionnement d'un équipement GPS réduit la durée de vie des batteries des nœuds de capteurs, réduisant de ce fait la durée de vie du réseau ;
- les nœuds de capteurs sont conçus pour qu'ils soient de petite taille afin de ne pas les détecter facilement. Or, la présence d'un module GPS et de son antenne augmenterait considérablement la taille du nœud.

Enfin, la localisation des nœuds dans les réseaux de capteurs joue un rôle primordial dans différentes applications. Cependant, la plupart de ces applications exigent une longue durée de vie qui dépend principalement de la durée de vie du réseau, un faible coût de déploiement, une couverture maximale de nœuds à localiser ainsi qu'une meilleure précision de positionnement. C'est dans ce contexte que notre mémoire s'inscrit.

1.3 Description des problèmes de la localisation

Dans la localisation des nœuds de capteurs, il existe 3 limitations fondamentales. D'abord, le nombre de nœuds localisés peut être limité. Cette limite est causée, si l'on excepte certaines contraintes des algorithmes de localisation, par la technique de répartition des nœuds (aléatoire ou uniforme) et par le degré de connectivité (nombre de voisins moyen par nœud) dans un réseau. Plus le degré de connectivité est grand plus la couverture (nombre de nœuds localisés) augmente. Par conséquent, une croissance du nombre de voisins des nœuds ne peut qu'engendrer une augmentation du trafic provoquant ainsi une augmentation accrue de la consommation d'énergie. Deuxièmement, la précision de l'estimation de la position des nœuds est le plus souvent limitée par les erreurs de mesure des distances et des angles entre les nœuds. Compte tenu de la nature du déploiement des capteurs, les erreurs de mesure sont causées dans la plupart du temps par la présence d'obstacle ou des changements des variations des signaux. À cette limitation s'ajoute

également l'influence du degré de connectivité. Généralement, plus le degré de connectivité diminue plus la précision se détériore et vice versa. Troisièmement, l'énergie consommée par les nœuds lors d'une phase de localisation est proportionnelle à la complexité de calcul et au nombre de messages échangés entre les nœuds. Ainsi, il existe un compromis entre la couverture, la précision de positionnement, l'énergie consommée et le degré de connectivité.

1.4 Contributions

Dans ce projet, nous avons considéré le problème de la localisation des nœuds dans des réseaux de capteurs à mobilité réduite. Nous nous sommes particulièrement intéressés à la résolution des problèmes cités précédemment. Dans ce sens, nous avons proposé trois contributions :

- Protocole d'échange d'information de localisation : ce protocole est basé sur l'utilisation des coordonnées des ancres, des angles d'arrivés (AOA) et sur les distances mesurées entre les nœuds. Ces informations sont encapsulées dans des messages que nous avons définis sous le nom de INIT et POSITION. Le message INIT est envoyé par chaque ancre vers les voisins immédiats tandis que le message POSITION est envoyé par chaque nœud non localisé. L'originalité de ce protocole repose sur la mise en place d'une structure de stockage de données jugées utiles pour la localisation et sur la qualité de l'information encapsulé dans les messages. Ces messages peuvent être utilisés d'une part dans le but de calculer les distances qui séparent chaque nœud des ancres voisines à deux sauts et d'autre part de pouvoir calculer les positions des nœuds à l'aide des algorithmes A2L ou HA-A2L.
- A2L (Angle to Landmark) [4]: cet algorithme a pour but de localiser un grand nombre de nœuds lorsque seulement un sous ensemble d'entre eux sont considérés comme des ancres (nœuds équipés de GPS). L'originalité de A2L repose sur son utilisation du protocole d'échange d'information susmentionné et sur la technique

des moindres carrés pour permettre aux nœuds initialement non localisés de calculer leurs coordonnées. Cependant, il ne prend pas en considération les erreurs de mesures.

- HA-A2L (High Accuracy- A2L) [5]: c'est une extension de A2L dont la caractéristique est de prendre en considération les erreurs de mesures. Il repose principalement sur le protocole d'échange d'information pour transmettre les informations utiles à la localisation des nœuds et sur l'application de la technique des moindres carrés et du centre de gravité d'une zone de confiance pour améliorer la couverture (plus de nœuds sont localisés). De ce fait, HA-A2L augmente la précision de l'estimation de la position des nœuds (moins d'erreurs de localisation).

Ce mémoire est présenté sous la forme par article. Le premier article, *A2L: Angle to Landmarks Based Method Positioning for Wireless Sensor Networks*, a été publié dans IEEE, International Conference on Communications, 2007 (ICC'2007 [17]). Tandis que le second article, *HA-A2L: Angle to Landmark-based High Accuracy localization method in Sensor Networks*, a été accepté dans ACM, International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2007 (IWCMC'2007 [12]).

1.5 Organisation du mémoire

Le reste de ce mémoire est organisé comme suit : dans le chapitre 2, nous présentons un aperçu de la littérature sur les techniques utilisées pour localiser les nœuds ainsi que les algorithmes qui les implémentent. Dans le chapitre 3, nous présentons en format article notre premier algorithme A2L où nous avons mis l'accent sur le protocole de communication, le nombre de nœuds localisés et l'énergie consommé plutôt que sur les erreurs de mesures. Dans le chapitre 4, nous proposons une amélioration de A2L en présentant l'algorithme HA-A2L capable de réagir efficacement dans des circonstances où

règnent les erreurs de mesures. Finalement, nous concluons ce travail en dressant quelques perspectives de recherche.

Chapitre 2

Revue de littérature

La localisation peut être définie comme un processus que chaque nœud adopte pour estimer sa position dans un repère. Cette estimation est la plupart du temps basée sur la collaboration des nœuds voisins qui, dans certains cas, connaissent leurs coordonnées soit statiquement (coordonnées introduites par de simples utilisateurs) soit dynamiquement (grâce aux ancrés) ou bien encore par le biais d'une phase antérieure du processus de localisation.

Dans ce chapitre, nous passons en revue certains travaux réalisés dans le contexte de la localisation des nœuds de capteurs. D'abord, nous présentons les techniques de mesure dont la plupart des algorithmes sont issus pour calculer la distance entre deux nœuds. Ensuite, nous parlons des erreurs de mesure qui influencent en grande partie la précision sur les coordonnées estimées des nœuds. Dans une troisième partie, nous présentons un certain nombre de techniques utilisées pour le calcul de la position des nœuds. Nous voyons en quatrième partie quelques unes des techniques de déploiement des nœuds dans les régions. Enfin, dans la dernière partie, nous abordons quelques algorithmes existants qui traitent de l'aspect de la localisation.

2.1 Techniques de mesure des distances

La distance entre deux nœuds dans un réseau de capteurs est la clé de l'estimation de la position d'un nœud. Plusieurs techniques existent pour estimer cette distance. Nous pouvons par exemple citer *Heure d'arrivée* (Time of Arrival ou TOA), *Différence de Temps d'arrivée* (Time Difference Of Arrival ou TDOA), *Angle d'arrivée* (Angle of Arrival ou AOA), *Force du signal* (Received Signal Strength Indicator ou RSSI) [34] dont nous allons donner les détails dans cette section. D'autres sont mentionnées dans [3]. Il est à noter que parmi ces techniques, certaines nécessitent des équipements supplémentaires pour assurer la procédure de mesure des distances.

2.1.1 Heure d'arrivée TOA

Typiquement, le GPS est un exemple d'algorithme basé sur l'heure d'arrivée. Cette technique utilise la relation simple qui existe entre le temps d'arrivée et la distance. Soit d la distance entre un nœud émetteur et récepteur des paquets et c la vitesse de propagation dans le milieu, la différence de temps entre l'émission et la réception est établie selon la formule suivante :

$$\Delta t = d / c \quad (1)$$

En général, un seul paquet aller simple est suffisant si le milieu n'est pas trop perturbé et si les horloges entre l'émetteur et le récepteur sont bien synchronisées pour connaître le temps de propagation et par la suite déduire la distance. Cependant, lorsque les nœuds ne sont pas synchronisés, deux paquets doivent être utilisés pour connaître le temps aller-retour du signal. Parmi les applications qui utilisent cette méthode, citons [25, 26].

2.1.2 Différence de Temps d'arrivée

Afin de mesurer la distance qui sépare deux nœuds voisins, la technique TDOA utilise le même principe que ToA à quelques différences près. Elle nécessite la transmission, à partir d'un émetteur, de deux signaux dont la vitesse de propagation est différente. Généralement, ce sont les ultrasons et les signaux radio qui sont utilisés à cette fin. Les références [14, 28, 30, 31] sont des algorithmes qui se basent sur cette technique. La figure 1 suivante, extraite de la source [34], illustre la propagation des signaux entre un émetteur A et un récepteur B :

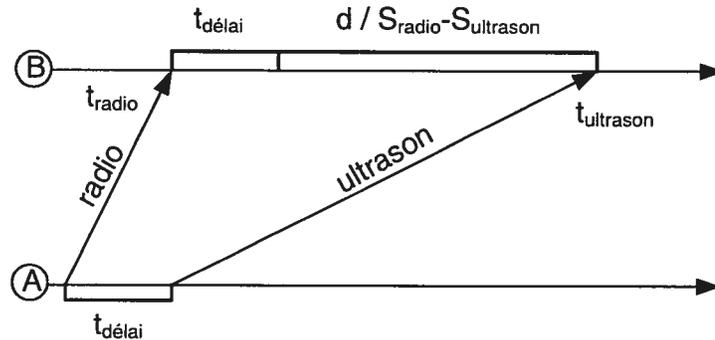


Figure 1. Illustration du principe TDOA

Ces deux signaux vont se déplacer avec des vitesses différentes et vont parvenir aux destinataires voisins à différents moments. Par conséquent, la distance sera connue par une simple application de la relation entre les vitesses et le temps traversés par le signal radio et l'ultrason :

$$d = (v_{radio} - v_{ultrason}) * (t_{ultrason} - t_{radio} - t_{délai}) \quad (2)$$

Où v_{radio} et t_{radio} représentent la vitesse de propagation et le temps de propagation d'un signal radio respectivement tandis que $v_{ultrason}$ et $t_{ultrason}$ caractérisent les ultrasons. $t_{délai}$ est le délai d'attente entre l'émission des deux signaux.

Cette technique présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, l'émission de deux signaux engendre une plus grande consommation d'énergie. De plus, la propagation des ultrasons nécessite des faibles portées afin d'assurer l'arrivée sans perte/affaiblissement des signaux aux destinataires. Enfin, les ultrasons ne peuvent être utilisés qu'à l'intérieur des bâtiments en partie à cause de la faible résistance aux interférences provenant d'autres sources d'ultrasons.

2.1.3 Angle d'arrivée AoA

Une autre méthode de calcul des distances consiste à mesurer les angles d'arrivée des signaux entre un nœud émetteur et un nœud récepteur. Les angles sont typiquement mesurés en utilisant des vecteurs d'antenne ou des microphones. Une simple application des règles trigonométriques pourra traduire les angles mesurés en distance (voir la section 2.3 pour plus de détail). Le nœud medusa [20] de la figure 2 est un exemple de nœud capable de réaliser cet objectif.

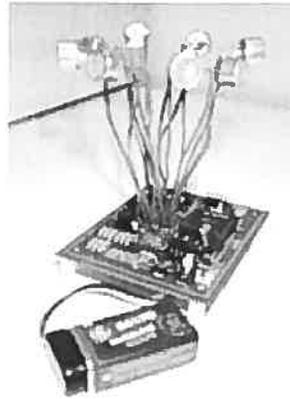


Figure 2. Nœud Medusa

Cette technique de mesure de l'angle d'arrivée est par exemple déployée dans les systèmes de radar [1] et GSM [24] ou encore dans d'autres techniques de localisation telles que celles décrites dans [19, 22,2]. Elle présente cependant un inconvénient : chaque nœud doit être équipé d'un matériel spécifique (antennes) pour déterminer les angles d'arrivée des signaux.

2.1.4 Force du signal RSSI

Une autre façon de calculer la distance entre deux nœuds consiste à utiliser la force du signal RSSI, soit la caractéristique physique du canal radio. En théorie, plus la distance

entre deux nœuds augmente et plus le signal s'atténue (l'indicateur de puissance RSSI diminue). Il est par conséquent possible pour un nœud récepteur d'estimer la distance qui le sépare d'un nœud émetteur en se basant sur la puissance du signal reçu. Les protocoles [16, 23, 26] utilisent cette technique de mesure.

2.2 Les erreurs de mesures

Lors du déploiement des réseaux de capteurs, les mesures effectuées au moyen des techniques décrites dans la section 2.1 peuvent être erronées. Tel que mentionné dans [32], les erreurs de mesures des capteurs sont classifiées en deux catégories : extrinsèques et intrinsèques.

- Les erreurs extrinsèques sont attribuées aux effets physiques sur les mesures des canaux tels que la présence d'obstacles, l'effet multi-trajets des signaux (réflexions multiples), les interférences des signaux et la variation de la vitesse de propagation qui peut être conditionnée par la variation des conditions de l'environnement. Ces erreurs sont imprévisibles et plus difficiles à manipuler lors du déploiement réel des réseaux de capteurs;
- les erreurs intrinsèques sont celles causées par des imperfections du matériel ou du logiciel. Elles peuvent aussi entraîner certaines complications lors de la localisation.

De telles erreurs ne peuvent être négligées dans le cas des nœuds qui estiment leurs coordonnées en se basant sur les coordonnées d'autres nœuds distants. En effet, pour qu'un nœud X calcule sa position, il se base sur celles de ses voisins. Étant donné que les positions des voisins peuvent contenir des erreurs, les coordonnées du nœud X seront biaisées et ces mêmes coordonnées seront transmises dans le réseau pour servir à localiser d'autres nœuds : l'erreur devient alors cumulative.

Dans la plupart des algorithmes de localisation [30, 22, 2, 23,32, 29], les auteurs modélisent le bruit (soit l'erreur de mesure) par une distribution gaussienne. En effet, de nombreux phénomènes aléatoires suivent approximativement la distribution de Gauss. Cette distribution, appelée communément distribution normale, est largement utilisée pour représenter et analyser les erreurs de mesures et les erreurs d'instruments. Elle permet d'obtenir une description exacte ou du moins une excellente approximation des phénomènes observés. Une variable aléatoire X est dite de loi normale $N(\mu, \sigma^2)$ si sa fonction de densité est :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2 / 2\sigma^2} \quad (3)$$

Où les paramètres μ et σ^2 représentent respectivement l'espérance et la variance de la variable aléatoire X . Tel qu'illustré dans la figure 3, cette fonction est continue et symétrique, par rapport à la moyenne μ . L'écart-type σ représente la distance entre l'axe de symétrie et l'un ou l'autre des deux points d'inflexion.

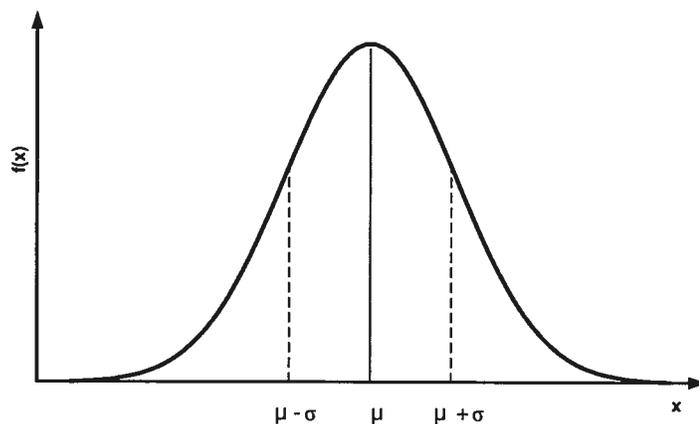


Figure 3. Loi normale

Pour interpréter les incertitudes d'une mesure, les surfaces situées entre des valeurs finies de σ sont souvent utilisées. La figure 4 souligne ce fait :

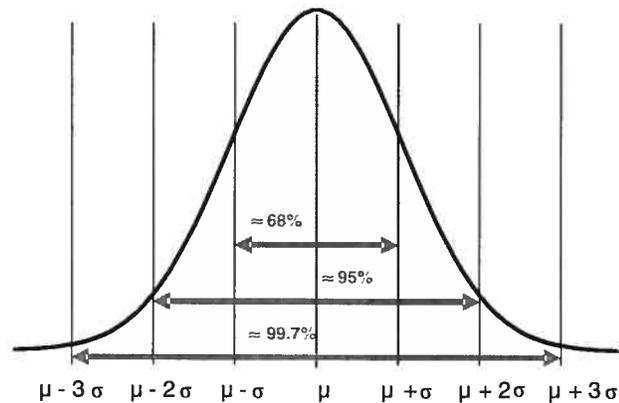


Figure 4. Propriétés d'une distribution normale

Si $\mu - \sigma \leq x \leq \mu + \sigma$, alors la valeur moyenne des mesures a environ 68,3% de chance de se trouver entre les limites de cet intervalle. Par contre cette valeur devient 95,5% si $\mu - 2\sigma \leq x \leq \mu + 2\sigma$.

Les chercheurs ont utilisé quelques approches pour réduire les erreurs de localisation dans leurs systèmes. L'une d'entre elles combine des contrôles de consistance géométriques et des tests statistiques pour identifier et éliminer les mesures incorrectes de distance [28, 36]. D'autres exemples concernent l'utilisation des *filtres de Kalman* dans RADAR [1] ainsi que les algorithmes *hill-climbing* dans SpotON [16].

2.3 Techniques d'estimation des coordonnées

Dans les sections 2.1 et 2.2 précédentes, nous avons montré comment calculer correctement la distance entre deux nœuds. Nous allons à présent voir en quoi ces mesures de distance vont servir à la localisation des nœuds.

L'estimation de la position d'un nœud est d'autant plus précise que le nombre d'ancres (ou points de référence) est grand. Un nœud se base ainsi sur les points de référence dont il dispose pour calculer ses propres coordonnées. La figure 5 suivante illustre ce principe. Sur la figure (a), la connaissance d'un seul point de référence (l'ancre $A1$) ne permet pas d'estimer précisément les coordonnées du nœud N (seule l'appartenance à une zone est obtenue). Tandis que sur les figures (b) et (c), nous remarquons que la zone se rétrécit. Celle-ci est délimitée par l'intersection des cercles de couverture radio.

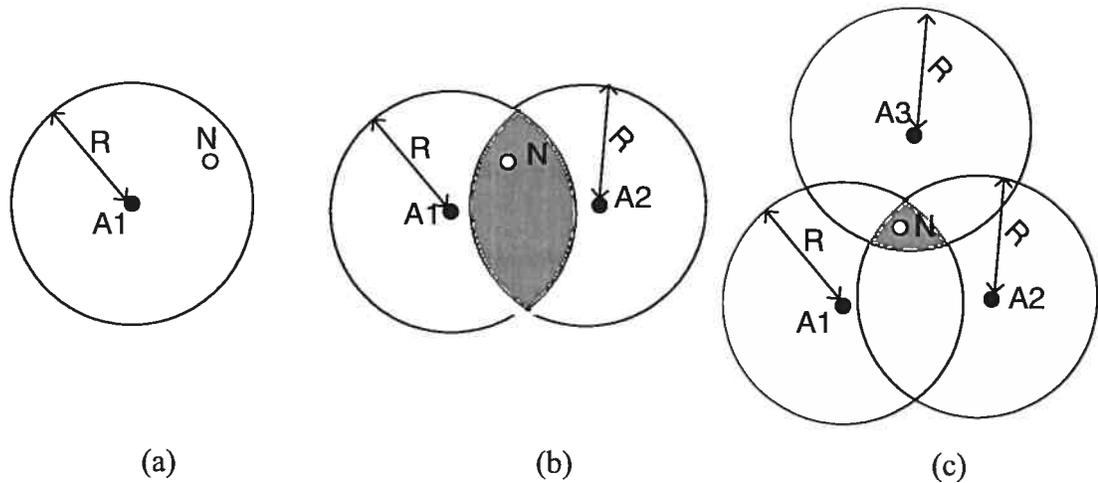


Figure 5. Principe de la localisation à l'aide des ancres

Trois méthodes géométriques permettent d'estimer la position des nœuds. Nous allons détailler chacune d'entre elles dans cette section.

2.3.1 La triangulation

La méthode de triangulation est employée lorsque l'angle d'arrivée entre deux nœuds peut être mesuré. Cela est rendu possible par l'utilisation de la technique AOA que nous avons décrite dans la section 2.1.3. Dans la figure 6, nous voulons calculer la distance entre B et C . B est un point de référence et A connaît les angles d'arrivées respectivement

de B et C . La distance \overline{BC} (d_3) peut ainsi être calculée en appliquant la formule trigonométrique :

$$d_3^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2 \times d_1 \times d_2 \times \cos(\angle BAC) \quad (4)$$

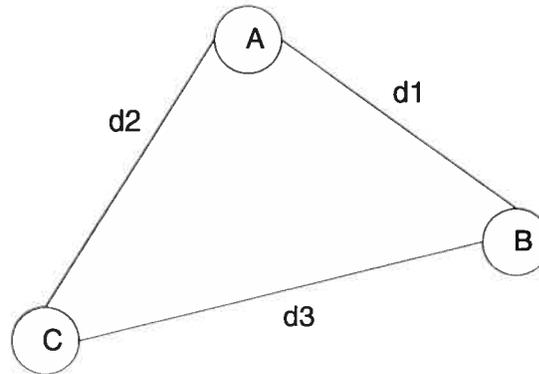


Figure 6. Illustration du principe de la triangulation

Connaissant les distances entre les nœuds, la méthode de triangulation est par la suite combinée avec la trilatération afin d'estimer la position des nœuds.

2.3.2 La trilatération

La trilatération est une technique classique pour estimer la position d'un nœud lorsque trois de ses voisins immédiats (voisins à un saut) sont considérés comme des points de référence et que les distances exactes entre ces points et le nœud sont connues. La figure 7 illustre le principe de la trilatération. S veut estimer sa position et il dispose pour cela les coordonnées des points de référence $A1$, $A2$ et $A3$ ainsi que les distances $d1$, $d2$ et $d3$ qui le séparent de ces points. Ces distances peuvent être calculées suivant l'une des méthodes citées dans la section 2.1.

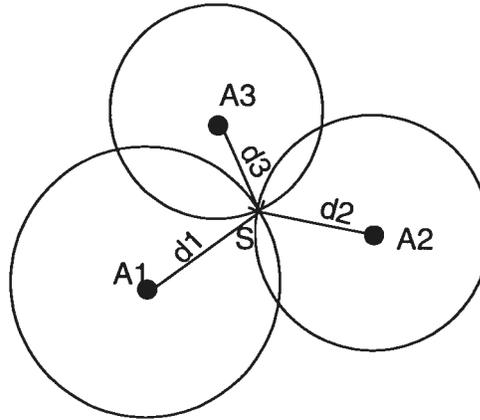


Figure 7. Illustration du principe de la trilatération

La résolution du système suivant donne la position du nœud S :

$$\begin{cases} d_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\ d_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \\ d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \end{cases} \quad (5)$$

Avec (x_1, y_1) , (x_2, y_2) et (x_3, y_3) les coordonnées respectives des ancres $A1$, $A2$ et $A3$.

2.3.3 La multilatération

Cette technique est une extension de la trilatération. Il s'agit d'utiliser plusieurs ancres (plus que trois) pour la localisation des nœuds. Cependant, cela reste une technique parmi d'autres qui permet de réduire la marge d'erreur car toutes les ancres vont participer à une multilatération (les simulations du chapitre 4 en sont la confirmation). Le schéma de multilatération est illustré sur la figure 8:

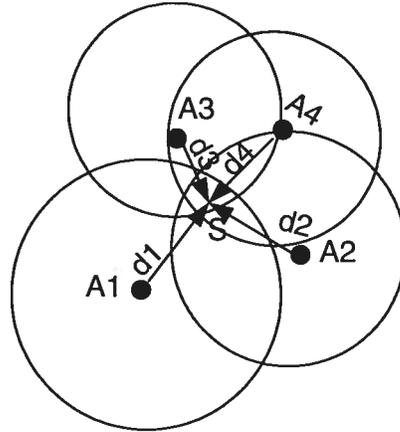


Figure 8. Illustration du principe de la multilatération

L'estimation de la position d'un nœud S au moyen de la multilatération résulte de la résolution de l'équation suivante (pour tout $i > 3$) :

$$(x - x_{A_i})^2 + (y - y_{A_i})^2 = d_i^2 \quad (6)$$

Avec (x_{A_i}, y_{A_i}) sont les coordonnées des ancres A_i quelque soit $i = 1..n$ (avec $n > 3$) alors que (x, y) sont les coordonnées du nœud S à calculer.

2.4 Techniques de déploiement des nœuds

Le succès d'un algorithme visant à localiser des nœuds avec moins d'erreurs dans les réseaux de capteurs dépend de deux paramètres essentiels : la connectivité des nœuds et le placement des ancres. Comme nous l'avons signalé dans la section 2.3, une information qui provient d'une seule ancre ne peut aider un nœud à se localiser. Au moins trois ancres sont nécessaires pour qu'un nœud détermine sa position avec plus de précision. Le cas idéal pour la localisation d'un nœud est le cas où celui-ci est situé à l'intérieur d'un triangle équilatéral dont les sommets sont des ancres. Dans le cas contraire, localiser un nœud situé soit au même endroit soit aligné avec trois autres ancres ne peut qu'engendrer des erreurs

de localisation si jamais le nœud réussit à se localiser. Soient A , B et C des ancrs. D est le nœud à localiser. La figure 9 illustre trois exemples de disposition des ancrs:

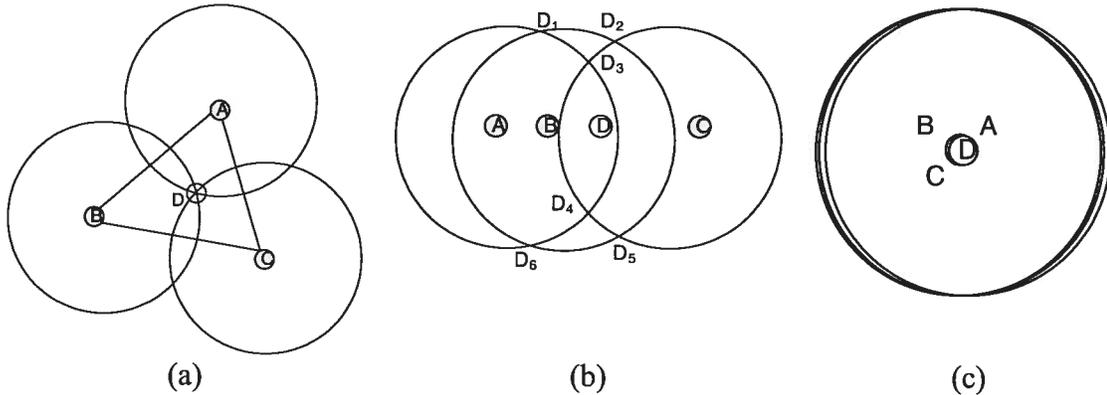


Figure 9. Exemples de disposition des ancrs

(a) nœud D localisé grâce à sa présence dans le triangle ΔABC . (b) cas ambigu causé par l'ensemble des nœuds alignés, D peut être dans l'une des intersections des cercles
 (c) cas où D ne peut se localiser, l'ensemble des nœuds sont sur le même point

Intuitivement, deux techniques peuvent résoudre les problèmes suggérés dans la figure 9 (a et b). Il s'agit d'utiliser un placement uniforme des ancrs et/ou d'augmenter la densité des ancrs utilisées. Cependant, l'utilisation de ces techniques n'est pas toujours réalisable pour les raisons suivantes :

- Le balancement uniforme des ancrs peut être perturbé par des conditions environnementales: lorsque les nœuds sont déployés par un avion sur le flanc d'une colline, les nœuds les plus lourds, qui d'habitude sont des nœuds équipés de GPS (ancres) risquent de glisser en bas de la colline tandis que les autres nœuds restent à leur place. Ainsi, on n'obtient pas une répartition uniforme ;
- augmenter la densité des ancrs engendre d'une part un coût plus élevé de l'application qui les utilise au vue du prix des ancrs et d'autre part réduit la durée de vie du réseau à cause d'une forte consommation d'énergie ;

- finalement, le risque d'existence des collisions des signaux transmis entre les ancrs augmente proportionnellement à leurs densités.

En adressant un intérêt particulier aux problèmes de déploiement des capteurs et leurs rôles dans la localisation, plusieurs techniques ont été proposées dans la littérature. Il y a ceux qui proposent un placement fixe et d'autres un placement adaptatif. Dans cette première catégorie de classe, certaines approches ont proposé une répartition des ancrs dépendamment des conditions environnementales et des exigences des applications. Pour une localisation à l'intérieur des bâtiments, Active Bat [36] et Cricket [28] utilisent presque la même technique de déploiement. Ils proposent de mettre les ancrs sur des plafonds permettant ainsi d'améliorer les lignes de visées (Line-Of-Sight). Tandis que dans [11] les auteurs proposent de mettre les ancrs sur le périmètre du réseau et particulièrement à chaque sommet. L'inconvénient majeur de ces techniques est qu'elles ne prennent pas en considération les variations possibles des conditions environnementales telles que les mouvements des nœuds et la nature des signaux propagés. Ces conditions ne peuvent, en principe, pas être prédites à priori.

Pour les techniques adaptatives, les auteurs dans [6] proposent un déploiement incrémental des placements et du nombre des ancrs afin d'améliorer la couverture et la précision plutôt que de refaire à chaque fois le déploiement. Trois algorithmes capables de déterminer automatiquement les positions où mettre les ancrs ont été proposés :

- Aléatoire : comme son nom l'indique, un emplacement aléatoire est choisi où une ancre sera ajoutée;
- max : dans ce cas, le terrain sur lequel sont déployés les nœuds de capteurs, est divisé en petite parcelle. L'erreur de localisation est calculée à chaque coin d'une parcelle. Afin de réduire cette erreur, une ancre est ajoutée à l'emplacement où l'erreur de localisation observée est maximale;

- *grid* : cette fois-ci, le terrain est partitionné en grille et une nouvelle ancre est ajoutée au centre de la grille où la somme des erreurs maximale est observée.

La figure 10 suivante, extraite de la source [6], illustre le principe des algorithmes *max* et *grid*:

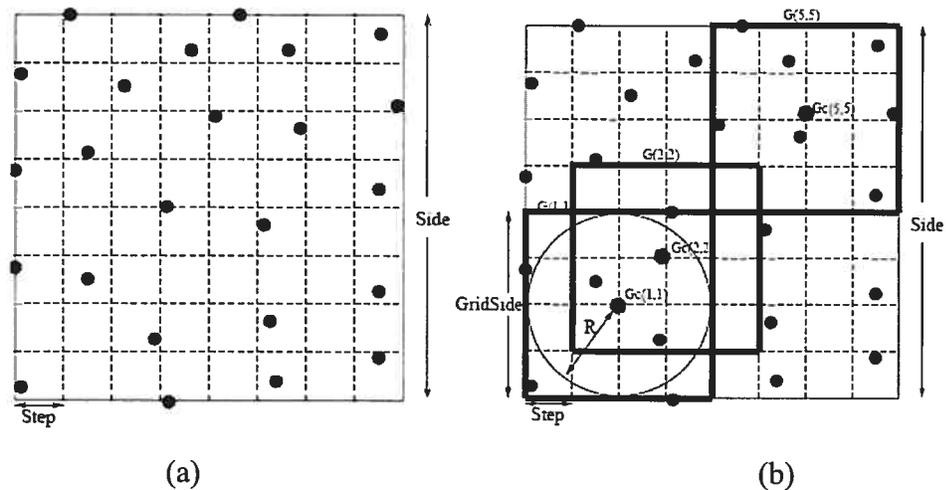


Figure 10. Techniques de placement des ancres

(a) *principe de max* (b) *principe de grid*

Un autre algorithme fondé sur le concept de *max* et *grid* a été proposé. STROBE (Selectively Turning Off BEacons) [7] réalise une densité adaptative des ancres capable d'améliorer la durée de vie des réseaux en minimisant la consommation d'énergie. L'idée de base de STROBE est de n'activer qu'un petit nombre d'ancres parmi plusieurs lors de leur déploiement intensif. Les autres seront en état de veille et seront stimulés au moment opportun (cas où une cible s'approche de l'ancre).

2.5 Les algorithmes existants de localisation des nœuds

Le problème de la localisation peut être résolu au moyen de plusieurs techniques, que nous pouvons classer selon leur fonctionnement en deux catégories :

- Approches centralisées: elles sont basées sur la transmission, par chaque nœud, des données nécessaires à la localisation vers un nœud/machine centrale où les calculs vont s'effectuer pour déterminer, si possible, les coordonnées de chaque nœud du réseau;
- approches distribuées : ce sont des approches où chaque nœud possède le pouvoir d'exécuter l'algorithme de localisation afin d'estimer sa propre position. Chaque nœud dans ces approches communique avec ses voisins immédiats qui pourront lui servir comme source de référence. Ces méthodes peuvent à leurs tours être classées selon leurs nécessités d'utiliser les techniques d'estimation des distances mentionnées dans la section 2.1. Ainsi nous distinguons :
 - o les méthodes basées sur la distance : ce sont des méthodes qui nécessitent la connaissance des distances et/ou des angles entre les nœuds. Les algorithmes qui l'utilisent se servent de l'une ou l'autre des méthodes d'estimation des distances mentionnées dans la section 2.1. Nous pouvons par exemple citer [4, 5, 10, 30, 31, 19, 26, 22];
 - o les méthodes non basées sur la distance : à la différence des méthodes basées sur la distance, ces méthodes n'estiment jamais la distance absolue entre deux nœuds en s'appuyant sur des propriétés telles que la puissance du signal ou l'heure d'arrivée. Par conséquent, les techniques de mesures de distance ne seront jamais utilisées [15, 21, 8, 29];

Indépendamment des distances, chacune des deux dernières catégories (basées et non basées sur les distances) regroupe deux sous ensembles :

- les méthodes basées sur des GPS : dans ces méthodes, les nœuds non équipés d'un GPS se basent sur la position des ancres pour déduire leurs coordonnées;
- les méthodes non basées sur des GPS : ces méthodes ne nécessitent pas l'utilisation d'ancres. Dans [9], les auteurs proposent de construire un système virtuel de

coordonnées au sein duquel les nœuds calculent leurs positions. Cependant, il est clair que ces méthodes sont difficiles à implémenter en pratique car elles manquent de précision à cause de l'absence de points de référence (GPS).

Nous allons présenter en détail plusieurs algorithmes qui se basent sur une ou plusieurs des catégories que nous venons de mentionner.

2.5.1 Approches distribuées

Parmi les approches que nous détaillons dans cette section, citons APS (Ad-Hoc Positioning System) où les auteurs ont développé une série de techniques d'inondation permettant aux nœuds de se localiser, AHLoS (Ad-Hoc Localization System) qui est une technique très répandue par sa précision au niveau de la localisation, et APIT (Approximate Point In Triangulation) qui se base sur une approche géométrique.

2.5.1.1 APS (Ad-Hoc Positioning System)

La méthode APS [21, 22] est la méthode la plus répandue dans les algorithmes de localisation. Elle fonctionne selon deux phases:

- Tout d'abord, un nœud estime la distance qui le sépare des ancres ;
- puis, à l'aide des distances obtenues et des positions connues, il calcule ses coordonnées au moyen d'une trilatération.

Durant la première phase, les ancres envoient leurs positions à leurs voisins à un saut afin que ceux-ci calculent les distances. Cette information est par la suite diffusée dans le réseau à l'aide d'une des quatre méthodes suivantes : DV-hop [21], DV-distance [21], DV-euclidean [21], DV-bearing/DV-radial[22].

DV-hop

DV-hop est une méthode qui entre dans la catégorie des méthodes basées sur des GPS et non basées sur les distances. Elle est composée de deux phases distinctes d'inondation. Durant la première, les ancres envoient à chacun de leurs voisins à un saut leurs IDs, leurs positions ainsi qu'un compteur du nombre de saut initialisé à 1. Le compteur est par la suite incrémenté et l'information continue d'être propagée de voisin en voisin. A la fin de cette première phase, les nœuds connaissent les positions et la distance en nombre de sauts des ancres. Dans une seconde phase d'inondation, les ancres convertissent le nombre de sauts en une estimation de la distance réelle. Aussitôt qu'une ancre *A* reçoit la position d'une autre ancre *B* durant la première phase, elle calcule la distance qui les sépare puis la divise par le nombre de sauts afin d'obtenir la distance moyenne entre *A* et *B*. La figure 11 suivante illustre le principe d'APS utilisant la technique DV-hop :

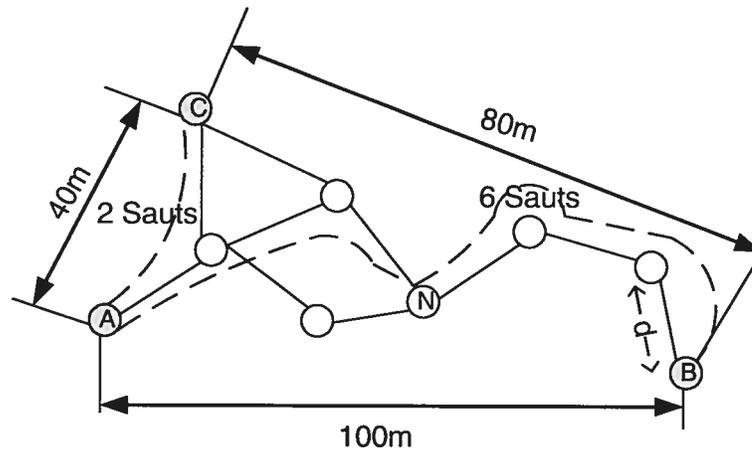


Figure 11. DV-hop

À la réception des informations relatives à C et B, le nœud A calcule la distance moyenne entre chaque paire de nœud de la façon suivante : $d = \frac{40 + 100}{2 + 6} = 17,5m$

Le nœud N sera ainsi capable de calculer les distances d_{NA} , d_{NB} , d_{NC} qui le sépare des ancres A , B et C respectivement : $d_{NA} = 3*d = 52.5m$, $d_{NB} = 3*d = 52.5m$, $d_{NC} = 2*d = 35m$.

DV-distance

Cette méthode est similaire à la méthode DV-hop précédente. La différence est que DV-distance est une méthode basée sur les distances. La distance entre deux nœuds voisins est mesurée par la technique RSSI. Durant la première phase d'inondation, les ancres commencent par diffuser leurs positions et une distance initialement égale à zéro. Les nœuds qui reçoivent cette information additionnent la distance contenue dans le paquet avec les distances estimées qui les séparent des nœuds transmetteurs. Les informations continuent d'être propagées jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de messages générés ou que la limite d'inondation (le TTL ou Time To Live) soit atteinte. Le TTL est le nombre de sauts maximum qui pourra être traversé par les paquets.

DV-euclidean

La méthode DV-Euclidean est classée parmi les méthodes basées sur les distances et sur les GPS. Dans cette méthode chaque nœud estime sa distance vers une ancre distante. Ceci est réalisable quand un nœud A reçoit de deux de ses voisins, B et C les distances qui les séparent d'une ancre distante L . L'ensemble des nœuds A , B , C et L doivent former un quadrilatère. Ainsi, le nœud A par application du théorème de Pythagore estime la distance euclidienne AL . La figure 12 montre le principe de DV- euclidean.

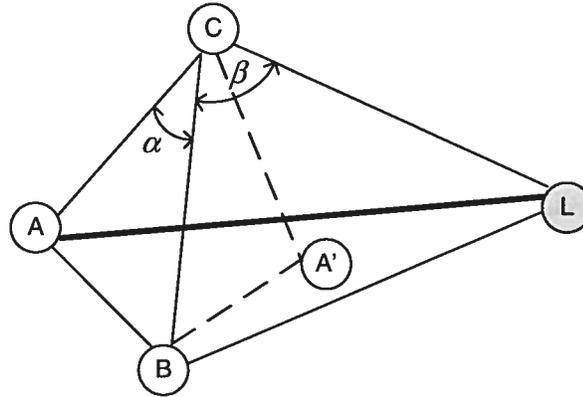


Figure 12. DV- euclidean

Lors du déploiement des nœuds, certains cas ambigus peuvent exister. Le conflit du choix entre la position A et A' en est un exemple dans la figure 12 où les distances \overline{AB} et \overline{AC} sont égales respectivement aux distances $\overline{A'B}$ et $\overline{A'C}$. Afin de résoudre ce problème en choisissant l'une ou l'autre des positions (A ou A'), la technique DV- euclidean envisage un mécanisme de vote ou d'analyse des voisins communs. Ainsi, le nœud A décide de la distance qui le sépare de L par vote dans le cas où il dispose de plus d'une paire de nœuds voisins, ou par analyse des voisins communs aux nœuds B et C .

Cette technique présente l'avantage de permettre aux nœuds d'estimer leurs distances vers les ancrés avec une meilleure précision. Par contre, son inconvénient réside dans le fait qu'elle nécessite un fort degré de connectivité pour assurer la réalisation des quadrilatères.

DV-bearing/Dv-radial

Les techniques DV-bearing et DV-radial utilisées par APS reposent sur l'utilisation des angles d'arrivées AOA. Cependant, elles nécessitent l'utilisation d'un vecteur d'antenne pour mesurer ces angles. Ces techniques permettent à un nœud d'estimer son angle de direction (bearing) ou l'angle radial vers une ancre distante. Ici le terme direction signifie l'angle mesuré respectivement à un autre nœud tandis que l'angle radial est

l'inverse de l'angle bearing, soit l'angle à partir duquel un nœud est vu à partir d'une autre position.

Pour qu'un nœud estime la distance qui le sépare d'une ancre distante, il applique une simple relation trigonométrique sur les angles connus. A ce niveau, un nœud doit, comme dans le cas de DV-euclidean, former un quadrilatère avec une paire de ses voisins et une ancre distante. Ceci dit que les deux méthodes présentent le même inconvénient que DV- euclidean.

Les techniques distribuées proposées par APS donnent à chaque nœud la capacité de calculer son orientation et sa position en se basant sur les références des nœuds voisins ou distant à plus d'un saut. Ces références peuvent être des ancrs ou des simples nœuds localisés dans des itérations ultérieures. Comme les erreurs de localisation peuvent être cumulatives (chaque nœud peut se baser sur les coordonnées d'un nœud calculées dans des itérations antérieures), APS utilise des techniques qui dépendent respectivement des méthodes d'inondations utilisées afin de limiter la propagation des erreurs. La limitation des paquets diffusés dans le réseau à l'aide d'une valeur de TTL choisie et l'élimination des angles dont la valeur est inférieure à une valeur seuil en est un exemple.

2.5.1.2 AHLoS (Ad-Hoc Localization System)

AHLoS [30] est une technique basée sur les distances et sur les GPS qui utilise, comme les systèmes Cricket [28] et BAT [36], les ultrasons et les signaux RF pour mesurer les distances entre les nœuds voisins. La différence entre AHLoS et les autres systèmes est qu'elle ne se sert pas d'infrastructures prédéfinies. Afin d'estimer leurs positions, les nœuds se basent sur le principe d'une multilatération qui peut être dans ce cas de trois types: atomique, itérative et collaborative.

Une multilatération atomique permet aux nœuds de se localiser une fois qu'ils disposent des distances et des coordonnées de plus de trois ancrs à leurs voisins. Quand un

nœud estime sa position il devient à son tour une ancre et transmet ses coordonnées pour aider les autres nœuds à se localiser.

Il est possible que dans la première phase de localisation (multilatération atomique) certains nœuds ne se localisent pas. Ce sont les nœuds qui ne disposent pas de plus de 3 ancres à leurs voisins ou bien les nœuds qui se trouvent alignés avec les ancres. AHLoS envisage d'utiliser dans ce cas une multilatération itérative. Soient, dans la figure 13 qui illustre ce principe d'une multilatération atomique et itérative, les nœuds 1, 2, 3 et 7 des ancres et 4, 5, 6 des nœuds qui ne connaissent pas leurs coordonnées. Les liens entre les nœuds indiquent l'existence d'une communication directe entre les nœuds (nœuds voisins).

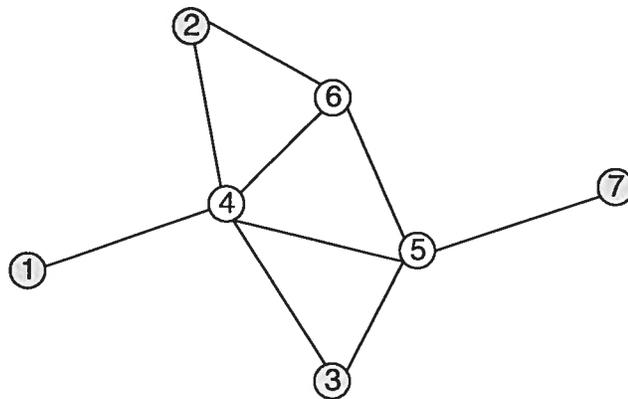


Figure 13: Principe d'une multilatération atomique et itérative

Initialement les ancres diffusent leurs coordonnées dans le réseau pour permettre aux autres nœuds de se localiser. Dans une première itération, le nœud 4 va calculer ses coordonnées (par application d'une multilatération atomique du moment qu'il dispose d'au moins 3 ancres 1, 2, 3) et se déclare comme ancre diffusant ainsi ses coordonnées. Au même moment, les nœuds 5 et 6 ne peuvent pas se localiser. A la réception des nouvelles coordonnées de 4 par les nœuds 5 et 6, le nœud 5 applique aussi une multilatération atomique pour se localiser (il connaît les coordonnées et les distances relatives aux ancres

3, 4, et 7). La procédure de localisation se poursuit ainsi itérativement pour permettre au 6 de se localiser.

Malgré l'utilisation d'une multilatération atomique et/ou itérative, certains cas ambigus peuvent se présenter. Supposons dans la figure 14 que 1, 3, 5, 6 sont des ancres et que les nœuds 2 et 4 sont des nœuds qui désirent calculer leurs coordonnées.

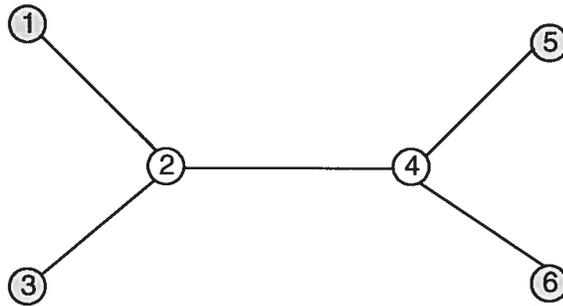


Figure 14. Cas ambigu pour une multilatération atomique ou itérative

Dans cette situation, les nœuds 2 et 4 ne peuvent être localisés par une multilatération atomique ou itérative. Dans ce cas, AHLoS envisage d'utiliser une multilatération collaborative semblable à la technique de l'analyse des voisins communs mentionnés en haut pour APS.

AHLoS est considéré comme l'un des meilleurs algorithmes distribués qui permet de localiser, dans une topologie donnée, plus de nœuds avec une meilleure précision (moins d'erreur entre les positions estimées et les positions réelles des nœuds). Cette amélioration est due d'une part à l'utilisation de la technique des moindres carrés itérative [30] et d'autre part à l'implication d'un grand nombre d'ancres (par exemple, pour localiser 90% des nœuds ayant chacun une moyenne de 6.28 voisins, AHLoS nécessite l'utilisation de 45% d'ancres comme référence). Cependant, les auteurs admettent bien que pour des topologies de grandes tailles, une amélioration de l'algorithme est souhaitable.

2.5.1.3 APIT (Approximate Point In Triangulation)

L'approche APIT [15] est une approche de localisation basée sur les GPS et non basée sur les distances. Elle nécessite la participation d'un certain nombre d'ancres capables de transmettre à grande distance pour couvrir tout ou partie du réseau.

Une région chez APIT est constituée d'un ensemble de triangles dont les sommets sont des ancres (figure 15 [15]). Chaque nœud dans ce cas choisit trois ancres dont il connaît les coordonnées puis délimite la zone (triangle) en testant son appartenance à cette zone.

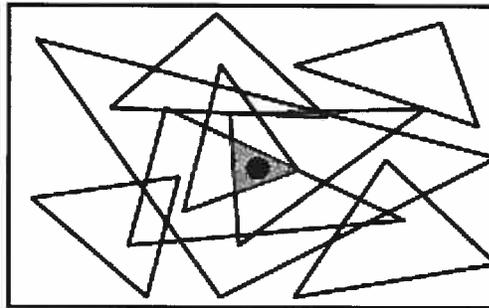


Figure 15. Estimation de la position d'un nœud par APIT

Pour qu'un nœud teste son appartenance à un triangle, APIT propose l'utilisation d'un PIT test [15] dont le principe est simple : en déplaçant le nœud M dans n'importe quelle direction, si la distance de M à l'un des sommets du triangle se réduit, cela signifie que M est bien à l'intérieur du triangle (figure 16 (a)). Alors qu'il est en dehors du triangle s'il existe une direction où la distance à l'un des trois sommets devient plus grande (cas de la figure 16 (b)).

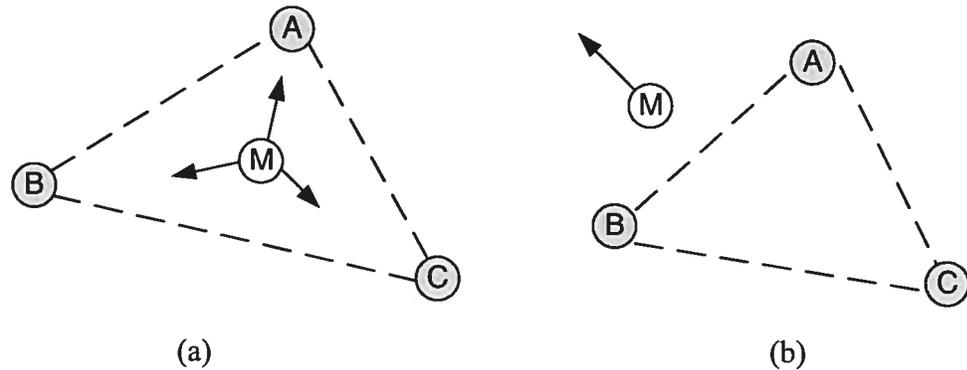


Figure 16. PIT test sur l'existence d'un nœud à l'intérieur d'un triangle

La procédure de délimitation des triangles est ainsi répétée à chaque fois pour chacun des triplets d'ancres voisins à un nœud. Ainsi, l'intersection des triangles forme une zone où le nœud peut exister et son centre de gravité est pris comme coordonnées à ce nœud.

Lors de la validité des tests d'appartenances des nœuds aux triangles, il existe certains cas qui ne garantissent pas une bonne précision. Ceci est le cas lorsque la distance entre un nœud et les ancres formant les sommets devient grande/petite lors du déplacement d'un nœud malgré le fait que le nœud soit bien dans/en dehors du triangle, comme nous pouvons le voir sur la figure 17 extraite de la source [15].

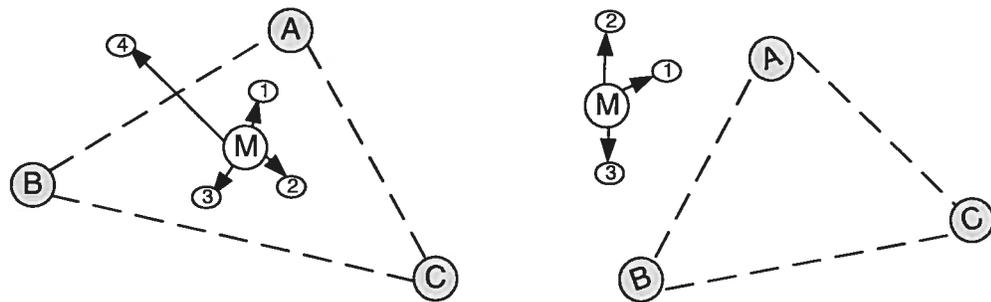


Figure 17. Cas d'erreurs observé chez APIT

Comme technique non basée sur les distances, APIT présente deux inconvénients majeurs. D'une part, pour assurer une meilleure précision et en évitant les cas ambigus présentés dans la figure 17, APIT nécessite l'utilisation d'une plus grande densité d'ancre. D'autre part, l'utilisation des ancres avec des grands rayons de transmission peut avoir des effets néfastes sur le réseau en augmentant le nombre de collisions de paquets et la consommation d'énergie.

2.5.2 Approches centralisées

Les approches centralisées consistent, comme nous l'avons signalé auparavant, à envoyer les informations manipulées par chaque nœud vers une station centrale (station de base) responsable du calcul des positions des nœuds. Cette station doit être munie d'une grande puissance de calcul, de stockage et d'énergie qui dépasse un nœud ordinaire dans le réseau. L'inconvénient majeur de ces approches est qu'elles demeurent infaisables pour les applications mobiles (qui nécessitent des déplacements des nœuds) : il faut à chaque fois envoyer les informations nécessaires à la localisation à la station de base. De plus, elles génèrent beaucoup de trafic dans le réseau. Ce trafic s'accroît avec l'augmentation du degré de connectivité et engendre par la suite une perte d'énergie considérable.

Parmi les approches centralisées figurent SDP (Semidefinite Programming) [11] et MDS-MAP (MultiDimensional Scaling-Map) [33]. Dans SDP, les auteurs considèrent la connectivité entre les nœuds comme étant le facteur essentiel pour estimer la position de chaque nœud. Tous les nœuds communiquent leurs informations de connectivité à un ordinateur central qui résout le problème d'optimisation et estime la position des nœuds. Quand à MDS-MAP, elle se base sur l'échelonnement multidimensionnel (MDS) comme approche d'optimisation. Elle utilise les informations de connectivités comme le cas de SDP pour estimer les positions des nœuds. Cependant, l'approche utilise d'autres données additionnelles, telles que les distances estimées (par RSSI) et les références des ancres pour améliorer ces positions.

2.6 Conclusion

Nous avons parcouru dans ce chapitre les techniques utilisées pour mesurer la distance entre deux nœuds adjacents et les façons d'exploiter ces distances afin d'estimer la position des nœuds. Compte tenu de la nature de l'environnement dans lequel les nœuds sont déployés, certaines erreurs falsifiant ces distances mesurées peuvent se glisser. Par conséquent, les positions estimées seront erronées.

Dans la littérature, plusieurs algorithmes de localisation des nœuds de capteurs ont été proposés. Parmi ces algorithmes, il existe une catégorie qui combine l'utilisation des GPS et la mesure des distances et/ou les angles entre les nœuds pour estimer avec une relative précision la position des nœuds. En effet, il est clair que sans recours à ces distances et aux coordonnées de ces GPS (d'un sous ensemble de nœuds), la localisation devient plus complexe, coûteuse, infaisable dans certains environnements, et/ou peut engendrer une grande marge d'erreur. Nous pouvons conclure que cette catégorie d'algorithmes est la plus adéquate pour le type d'applications/environnements visés dans ce projet.

Le tableau 2 donne un aperçu des propriétés de ces algorithmes (vu dans la section 2.5.1 du chapitre 2). Nous remarquons qu'il existe des algorithmes qui se basent sur un fort pourcentage d'ancres et un fort degré de connectivité et qui localisent un grand nombre de nœuds avec une forte précision (AHLoS) tandis que d'autres utilisent un nombre moyen d'ancres et un fort degré de connectivité tout en localisant un nombre moyen de nœuds avec une précision moyenne (DV-euclidean et DV-bearing/radial).

Les algorithmes que nous proposons dans ce mémoire (chapitres 3 et 4) font partie des méthodes basées sur les distances et les GPS où, d'une façon distribuée, chaque nœud estime sa propre position en se basant sur celles de ses voisins qui se trouvent distants de deux sauts maximum. Nos deux méthodes offrent un pourcentage de nœuds localisés élevé

avec une meilleure précision. Elles ne nécessitent qu'un faible degré de connectivité et un faible taux d'ancres, ce qui réduit le coût et la consommation d'énergie des applications.

Approches		Basé sur les distances	Basé sur les GPS	% des ancres pour une bonne précision	Degré de connectivité	% des nœuds Localisés	Précision de Localisation
APS	Dv-hop	Non	Oui	Fort	Faible	Fort	Faible
	DV-distance	Oui	Oui	Fort	Faible	Fort	Moyenne
	DV-euclidean	Oui	Oui	Moyen	Fort	Moyen	Moyenne
	DV-bearing/radial	Oui	Oui	Moyen	Fort	Moyen	Moyenne
AHLOS		Oui	Oui	Fort	Fort	Fort	Forte
APIT		Non	Oui	Fort	Moyen	Fort	Faible

Tableau 2. Aperçu des propriétés d'un ensemble représentatif des méthodes distribuées

Chapitre 3

Localisation des nœuds de capteurs dans un milieu exempt d'erreurs

Mise en contexte

Dans ce chapitre, nous allons traiter le problème de la localisation des nœuds de capteurs dans un milieu exempt d'erreurs (c'est-à-dire un milieu où les mesures des angles et des distances sont exactes). Nous proposons pour cela un nouvel algorithme appelé A2L qui se base sur le principe des angles d'arrivés des signaux et sur l'estimation des distances entre les nœuds pour leur permettre d'estimer leurs positions. En effet, les coordonnées d'un nœud sont calculées par la technique des moindres carrés une fois que ce dernier connaît au moins trois références et distances qui le séparent de trois ancrs situées à un ou deux sauts plus loin que lui.

Pour étaler le calcul et impliquer les ancrs à un et deux sauts, A2L utilise un protocole de communication qui implémente deux types de messages. Il s'agit du message INIT initialement envoyé par les ancrs vers leurs voisins immédiats et du message POSITION qui contient, entre autres, la différence des angles d'arrivées des signaux en provenance des ancrs et d'autres nœuds. A l'aide de cette différence et par application d'une triangulation, la distance entre un nœud et une ancre voisine à deux sauts sera connue.

À l'aide des simulations, nous étudions l'effet du TTL (le nombre de sauts maximum qui pourra être traversé par les messages) et du nombre d'ancres sur le nombre de nœuds localisés ainsi que sur l'énergie consommée. Le travail et les résultats présentés dans cette section ont fait l'objet d'un article intitulé « A2L: Angle to Landmarks Based Method Positioning for Wireless Sensor Networks » et publié dans la conférence IEEE International Conference on Communications, 2007 (ICC'2007 [17]).

A2L: Angle to Landmarks Based Method Positioning for Wireless Sensor Networks

Mustapha Boushaba¹, Abderrahim Benslimane², Abdelhakim Hafid¹

¹Network Research Laboratory, Université de Montréal

CP 6128 succ Centre-Ville

Montréal, QC, H3C 3J7, Canada

{boushamu, ahafid}@iro.umontreal.ca

²Laboratoire Informatique Université d'Avignon

339 chemin des Meinajaries BP 1228-84911

Avignon Cedex 9, France

benslimane@lia.univ-avignon.fr

Abstract

Thanks to recent technological progress, autonomous wireless sensor networks have experienced considerable development. Currently, they are used in the areas of health care, environment, military etc. For a number of sensor-based applications, the knowledge of the positions of sensors is required or, at least, preferable. In this paper, we propose a new method to locate a large number of nodes in wireless sensor networks where only a subset of them are landmarks (i.e., know their positions). Our method is AOA-based (Angle Of Arrival) and it is called A2L (Angle to Landmark). Compared, via simulations, to previous methods such as APS and AHLoS, A2L considerably increases the number of located nodes with accurate precision while using a smaller node degree.

Keywords- wireless sensor networks, localization, Angle of Arrival, trilateration.

I. INTRODUCTION

Sensor networks are becoming a standard technology in wireless communications. The development of these networks involves many different research areas, such as communication, sensing and computing. This leads to smart disposable micro-sensors that

can be deployed anywhere regardless of geographic limitations. Therefore, such sensors may be used widely in military, national security, environment monitoring, traffic surveillance, medical domains. These networks usually use a large number of tiny sensors. Sensor nodes are low-cost, low-power, and communicate in short distances. Together, they communicate in wireless mode and collaborate to provide information for common missions. A sensor node has generally embedded processing capabilities and potentially has a number of sensors dedicated to sensing different features, such as acoustic, seismic, infrared (IR), and magnetic elements; it can also operate as an imager/micro-radar device.

For specific applications, some nodes must know their physical positions to determine where events occur. Sensor node location can be found by using extra hardware such as GPS (Global Positioning System); however, equipping each sensor node with GPS is very expensive in terms of energy and cost. A more acceptable solution would require only a subset of nodes equipped with GPS; the positions of their neighbors are computed using techniques, such as trilateration and triangulation. It has been proven that the trilateration cannot be used alone for node localization within a network with a very small density of GPS nodes. Most techniques use recursive algorithms combining triangulation with trilateration or multilateration.

Some of the GPS-based methods use estimated distance between pairs of neighbors. These methods are called Range-Based Localization Schemes (in contrast with Range-Free Localization Schemes [1, 2, 3]). The most popular methods are RSSI (Received Signal Strength Indicator), ToA/TDoA (Time of arrival / Time difference of arrival) and AOA (Angle of arrival). In RSSI, nodes measure the power of the received signals and thus, can calculate the effective propagation loss. Theoretical or empirical models are used to translate this loss into distance. In ToA/TDoA, nodes directly translate the propagation time into distance if the signal propagation speed is known. The most basic localization system using ToA techniques is GPS [4]. In AOA, nodes estimate the angle at which signals are received and use simple geometric relationships to calculate their positions. The accuracy

of these measurements is closely related to the network environment; thus, the positions computed by the nodes may contain errors.

In this paper, we propose a localization algorithm called Angle to Landmark (A2L). This algorithm is based on some existing techniques, such as Angle of Arrival (AOA) and distance estimation for computing nodes positions. Our technique is low cost and does not require expensive infrastructure and any compass. With a fraction of the nodes as landmarks, A2L allows each node in the network to calculate its own position. Compared to existing methods, such as APS and AHLoS, A2L considerably increases the number of located nodes with better precision.

The paper is organized as follows: Section II presents related work. Section III describes the proposed A2L algorithm. Section IV evaluates the performance of A2L using simulations. Section V concludes the paper and presents future work.

II. Related work

A large number of existing techniques attempt to solve the localization problem. A detailed survey can be found in [5]. We identify four categories:

- Infrastructure-based systems: They require infrastructures like RADAR [6] or Cricket [7].
- Robot-based systems: They use robots to locate nodes [8].
- GPS-free methods: They do not require landmarks to locate nodes. The authors in [9] propose a method that builds a virtual system of coordinates, and the nodes compute their positions in this virtual system.
- GPS-based methods: They use the positions of landmarks to determine estimated positions of non-landmark nodes.

The authors, in [10, 14, 2], use distance and angle information to compute a node's position. APS [12] uses the angle-of-arrival technique (AOA) for localization; all nodes have the capability to compute orientation and position. In APS, nodes iteratively obtain position and orientation information starting from landmark nodes. When a non-positioned node knows at least three landmarks, it can apply the trilateration technique for computing its position and its orientation to the landmarks. This information is broadcasted to neighbors for subsequent iterations. To compute its position, a node X needs to have at least two neighbors, Y and Z , which have estimates - angles or ranges for landmark L (Y and Z should to be neighbors too).

Let us consider the topology shown in Fig.1; nodes A, B, C are landmarks and D, E are non-positioned nodes (i.e., do not know their positions). With APS, the landmarks A, B and C start the localization mechanism. In a recursive way, nodes E and D try to compute their positions and their orientations towards landmarks. Node E needs to have two neighbors that know the coordinates or the orientation towards landmark C ; this is not the case in the topology shown in Fig. 1. Thus, no quadrilateral can be formed between node D and the landmark C ; the same applies for localizing node E . In this topology, APS cannot locate nodes D and E .

Other techniques are hybrid ones, such as the technique described in [15] where the authors combine APS with two other existing localization methods, namely MDS (Multidimensional Scanning) and SDP (Semidefinite Programming). MDS calculates positions using a set of distances whereas SDP is a relaxation based method.

In [11] the authors propose an AHLoS system that produces high quality positions. It uses ultrasound and RF techniques to deal with the ranging problem. To estimate node locations, AHLoS uses a set of nodes initially configured as landmarks and defines several types of multilateration: atomic, iterative, and collaborative. Atomic multilateration can be applied as a basic multilateration when a node has enough landmarks neighbors. Once at

least three distances to three landmarks are known, a node may compute its own location. When a node estimates its position, it becomes a landmark. Therefore, an iterative multilateration continues until no more nodes can be localized. AHLoS does not guarantee that all the nodes will be able to compute their positions. In a collaborative fashion, nodes try to estimate their locations using beacons at two hops away.

The main drawback of AHLoS is that it requires high percentage of beacons to achieve high percentage of located nodes. For example, to resolve 90 percent of unknown nodes with an average degree of 6.28, AHLoS requires a density of 45% landmarks.

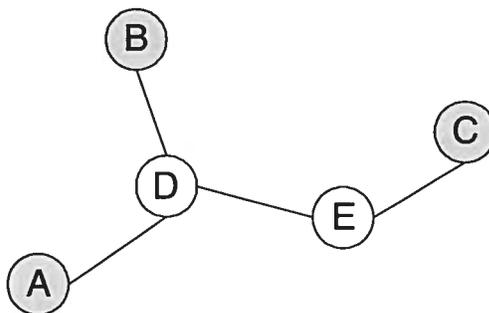


Fig 1. Sample topology: 5 nodes with 3 landmarks

To improve localization rate with better accuracy, using a small set of landmarks and a small node degree, we propose A2L that locates more nodes than existing approaches, e.g., A2L allows locating *D* and *E* in the topology shown in Fig. 1 (see Section III for more details).

III. Angle to Landmark Algorithm

In this Section, we present a new method that allows localizing a high percentage of nodes in wireless sensor networks by using a minimum number of landmarks. It is AOA-based where each node computes the difference between two AOAs: incoming angle from landmark neighbors and from non-positioned neighbors (Fig. 2). These angles are used to

Let us assume a 2-D space, (x,y) is the unknown position, and (x_i,y_i) are the coordinates of the i^{th} landmark for $i = 1, \dots, n$. The coordinates and the estimated distance (d_i), distance between the i^{th} landmark and (x,y) , are related by the following set of equations:

$$\begin{bmatrix} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^2 \\ \vdots \\ d_n^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

To resolve this set of equations, we transform (2) into a linear system of equations by subtracting the n^{th} equation (the last line in (2)) from each other equation (lines 1 to $n-1$ in (2)). The linear system is written in the form $AX = b$, where

$$\begin{aligned} X &= [x \quad y]^T \\ A &= \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \\ b &= \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

When range (d_i in (2)) measurements are noisy, resolving different equations (lines in (2)) would not yield the same results. To solve this, we use a least-squares solution (4) which is a technique borrowed from linear algebra that is often used in applications that consists of over-determined systems with noisy measurements.

$$X = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4)$$

A. Message exchanges by A2L nodes

We consider an adhoc network R modeled by a bidirectional graph $G = (NR, E)$, where NR represents the set of sensor nodes and E the set of links between nodes. A link between two nodes exists if each node is within the transmission range of the other. We classify nodes into two sets: (1) NL : the set of landmarks (i.e., know their positions using GPS for example); and (2) NnL : the set of non-positioned nodes. All nodes in NL and NnL are randomly placed in a geographic area using a uniform distribution.

The goal of our proposed protocol is to locate a maximum number of nodes in NnL by using a minimum of landmarks. Our protocol requires that nodes exchange two messages called *INIT* and *POSITION*:

- *INIT message*

It is broadcasted once by NL nodes (landmarks) to their immediate neighbors (one hop). The *INIT* message structure is defined by two fields $\langle idL, CoordL \rangle$, where idL is the identifier of the sending node and $CoordL$ its coordinates (x,y) .

- *POSITION Message*

When the message *POSITION* is broadcasted, a receiver node K can extract information of interest from A2L records; this will help K (if non-positioned node) to locate itself. This message is broadcast by each node I , in NnL , having at least one neighboring landmark J and another neighboring node K which is not a landmark. When node K receives this message, it can compute its distance towards landmark J by applying the triangulation mechanism using equation (2). The format of the message *POSITION* is defined as: $\langle idS, CoordS, A2L_1, A2L_3, \dots, A2L_n \rangle$

where (a) idS is the identifier of the node which broadcasts the *POSITION* message;
 (b) $CoordS$ are the coordinates (x,y) of the sender node broadcasting the message

POSITION; and (c) $A2L_K$ is defined as $\langle idL_J, idL_K, CoordL, DistL, Angle \rangle$, where idL_J is the identifier of landmark J , idL_K is the identifier of node K to which the message A2L is destined, $CoordL$ are coordinates (x,y) of landmark J , and $Angle$ is the angle between landmark J , transmitter I and the receiver K of A2L message. This angle will be computed by node I ; it is the difference between two AOAs (AOA from nodes J and K).

B. A2L algorithm

Initially, every landmark initializes A2L positioning algorithm by broadcasting *INIT*. For each node, the MAC Layer can provide information for building Neighbors table, called *TN*, shown in Fig. 3. For each node I , each entry of *TN* includes: (1) *id*: node's identifier from incoming signal; (2) *AOA*: incoming angle from node *id*; and (3) *Distance*: the distance between node *id* and node I .

Id	AOA	Distance

Fig.3 Neighbors table structure

When a landmark's neighbor I receives *INIT* messages, it updates its landmarks table, called *TL* (Fig. 4), and tries to resolve the corresponding trilateration system by using equation (4). Node I must have at least three non-aligned landmarks in its *TL* table. For each node I , each entry of *TL* includes: (1) *idL*: the landmark identifier; (2) *Coord*: coordinates (x,y) of landmark *idL*; (3) *Distance*: the distance between landmark *idL* and node I ; it is retrieved from *TN* or computed by triangulation; and (4) *nextHop*: the sender of the message *POSITION*. If its value is equal to *idL* then the landmark *idL* is neighbor; otherwise, they are two hops away.

Node I builds a list of A2L by combining the *TL* and *TN* records; the Angle in each element of the list corresponds to the difference between the AOA from landmark J and the AOA from node K . This information allows node I to build the *POSITION* message to be

broadcasted toward its neighbors. As an example, let us consider node I (with identifier equal to 3), that maintains two tables: (1) TN with 3 entries $\langle 4, 2.3, 10; 5, 1.1, 12; 6, 3.2, 10 \rangle$; and (2) TL with one entry $\langle 5, (850, 200), 12, 5 \rangle$. The information in TL means that node 5 is a landmark and it is one hop away from node 3. The message $POSITION$, to be broadcasted by 3, will include two A2L fields:

$$A2L_4 = \langle 5, 4, (850, 200), 12, 1.2 \rangle$$

$$A2L_6 = \langle 5, 6, (850, 200), 12, 2.1 \rangle$$

Thus, $POSITION = \langle 3, , A2L_4, A2L_6 \rangle$. In this example, the field $CoordS$ is null; this means that node 3 (I) cannot be localized; it broadcasts its message $POSITION$ to help nodes 4 and 6 to compute their location.

idL	Coord	distance	nextHop

Fig.4 Landmarks table structure

Upon receipt of a $POSITION$ message, a non-positioned node J checks whether the message contains A2L; if the response is yes, it applies triangulation to compute the distances towards other landmarks at two hop neighbors and updates its table TL . Node J consults its table TL to compute its position. It must have at least three non aligned landmarks. Therefore, to compute its position, J takes into consideration landmarks at one hop then landmarks at two hops. This technique allows node J to compute its position with a better degree of accuracy by reducing errors caused by AOA measurement. If the least-squares system is resolved, node J becomes a landmark and notifies its neighbors by broadcasting the corresponding $POSITION$ message. Otherwise, it simply broadcasts $POSITION$ messages to help other nodes to be localized. The coordinates (x,y) sent by node J will help nodes that are n ($n > 2$) hops away computing their positions.

Algorithm. 1. Angle to Landmark Algorithm: process when node i receives a message *POSITION*

Input: message *POSITION*

Output: the coordinates of node i and the message *POSITION*

Variables:

- $nb2L$ is the number of landmarks at two hops from node i .
- nbL is the number of landmarks at one hop (immediate neighbors of node i).
- *TL* table is a landmarks table

Functions:

- Receive (*POSITION*): it is used to check the A2L fields in the message *POSITION* which are intended for node i and updates the landmarks table (*TL*) that node i maintains.
- Positioning (*TL*): it is used to compute the node's position by applying the least-squares technique and builds message *POSITION*.
- Broadcast (*POSITION*): it broadcasts the message *POSITION* to the neighbors of node i .

----- **Algorithm** -----

```

1 For ( $i \in NnL$ ) {
2   Receive (POSITION);
3   If ( $nb2L+nbL \geq 3$ ) {
4     POSITION = Positioning(TL);
5     Broadcast (POSITION);
6   }
7 }
```

Let us consider the topology shown in Fig 2 to describe the execution of the proposed algorithm (Algorithm 1). Initially, A , F , D and G broadcast their messages *INIT*. None of the nodes B , C , and E is located after the first iteration. Node E builds and

broadcasts the message *POSITION* including: (a) angle θ (where $\theta = |\theta_N - \theta_F|$); (b) position F and (c) distance d_{EF} . At the same time nodes B , C , and N compute the angles to landmarks and broadcast their values with landmarks coordinates and distances (i.e., message *POSITION*). By receiving the messages *POSITION*, node N computes distances d_{ND} , d_{NA} and d_{NF} , updates its *TL* and applies trilateration to compute its position. The TTL (Time To Live) value in this case is equal 2. When N is localized, it broadcasts its message *POSITION* containing its position and A2L fields; nodes B , C and E can use this message to be located. Thus, all nodes are located with TTL maximum value equal to 3.

IV. Experimental results

In order to evaluate the performance of A2L, we developed our own JAVA-based simulator. We assume that all messages, broadcasted by nodes during simulation, are reliably delivered to their neighbors. We generate many random sensor network topologies according to the number of nodes and the number of landmarks; we use a square area where nodes are randomly placed using a uniform distribution. Landmarks are selected randomly and nodes' degrees (average number of neighbors) are controlled by the specification of their radio range. We assume that each node is equipped with an AVR microcontroller [13]. For our simulation, we set the radio transmission power to 0.24mW. The simulation results represent the average of 100 executions.

We studied the effect of TTL and the landmark rate on the rate of nodes being positioned (percentage of non landmarks able to compute their positions) and the corresponding energy consumption. Our results are compared with APS using AOA and AHLoS respectively. We believe that it is preferable to limit the TTL value to 2 for better accuracy localization as localization errors increase with TTL. However, our simulations cover a wide range of TTL values.

In the first set of simulations (Fig 5), we consider a scenario with 300 nodes and 10% of landmarks. We execute A2L and APS algorithms for various values of TTL (from 1 to 10) and various node degrees (4.2, 6.14, 10.27) with TTL value equal to 1; only the nodes with at least three landmarks can apply the trilateration technique to compute their positions. With TTL value equal to 6, A2L improves, compared to APS, the localization rate by 16% in the case the node degree is equal to 4.6, and by 21%, in the case the node degree is equal to 6.14. In the case of a large node degree, such as 10.27, A2L locates 12% (resp. 3%) more than APS with TTL equal to 2 (resp. 6). Further the localization improvement, A2L converges faster than APS; indeed, A2L locates all the nodes with TTL value equal to 6 while APS requires TTL value equal to 7. The superiority of A2L is laid in the angles that a node forms with its neighbors and a distant landmark; knowing these angles, even if a node doesn't have any immediate landmark neighbor, it can use its two-hop landmark neighbors and apply trilateration to compute its position; this is not the case for APS. Hence, A2L is more efficient than APS in uniform topologies with small or large node degree.

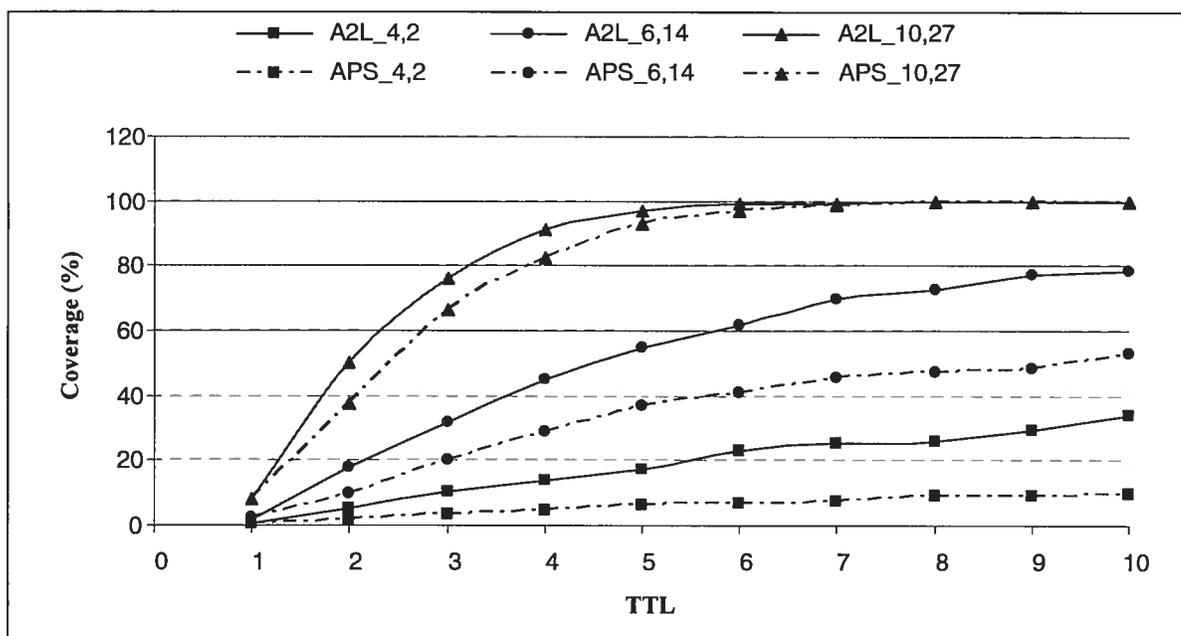


Fig.5 A2L vs APS Coverage in different node degree (4.2, 6.14, 10.27)

In the second set of simulations, we set the TTL value to 2 and vary the landmarks rate in a 300-nodes topology. The radius is set to 14. In this scenario, the average node degree is 6.14. Fig. 6 shows that A2L requires only 45% of landmarks (i.e., 45% of the network nodes are landmarks) to locate 63% of non-localized nodes, whereas APS requires more than 70% of landmarks to achieve the same goal. APS's problem is that it requires that each node should form a quadrilateral with two neighbors and a landmark. This situation usually occurs in networks with high node degree. We conclude that A2L requires fewer landmarks than APS (using AOA) to locate the same amount of nodes.

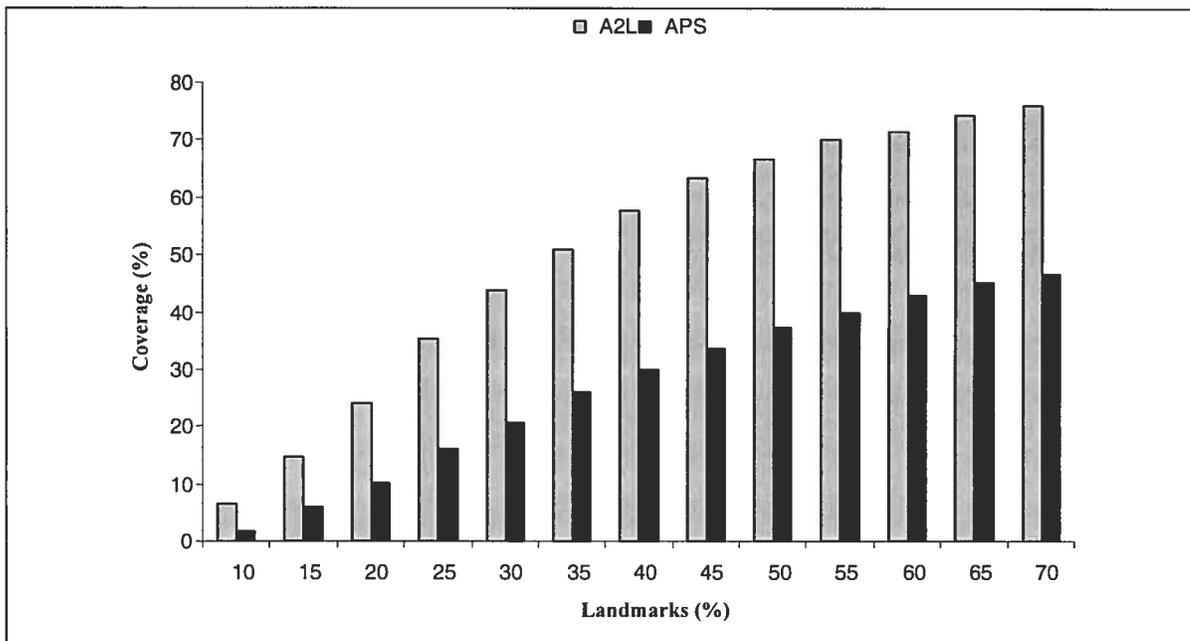


Fig.6 localized nodes rate vs landmarks in 300 nodes network

In the third set of simulations we study the relationship between the localization rate, the amount of landmarks required and the average node degree.

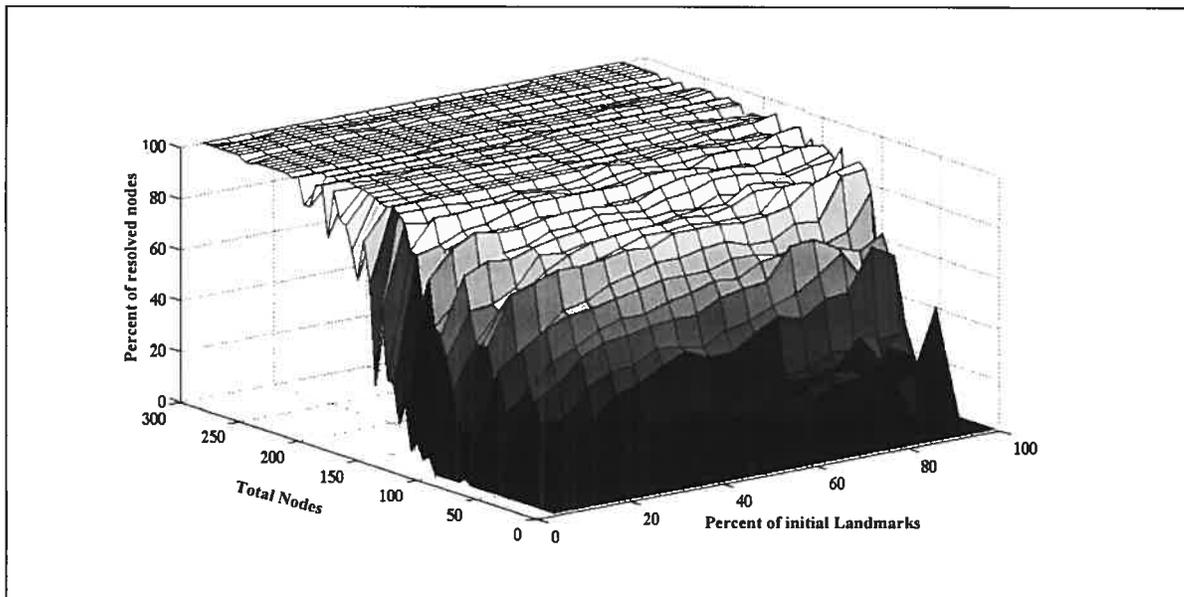


Fig.7 Required landmarks for localization in networks with different sizes in as square area
100x100

Fig. 7 shows that A2L, for a 200-nodes network (average node degree is equal to 5.36), uses only 15% of landmarks to localize 98% of the network's nodes. These results show the superiority of A2L over AHLoS [12], which requires an average node degree equal to 6.28 to localize 90% of the nodes with 45% of landmarks.

In the fourth set of simulations, we study the relationship between the amount of traffic generated - during the localization process - by the network nodes and other attributes, of interest, including network size, energy, etc.

Fig. 8 shows the variation of the average number of transmitted bytes with the network size; the number of transmitted bytes is computed by summing the sizes of all *INIT* and *POSITION* messages generated/broadcasted by landmarks and non landmarks to locate the maximum number of nodes. Fig. 9 shows the variation of the energy consumption with the network size; the transmission power of the network's (Medusa) nodes is set to 0.24mW. The slight energy variations between the network's sizes are explained by the

increase of the node degree and the fast convergence of the nodes toward the greatest rate of localization.

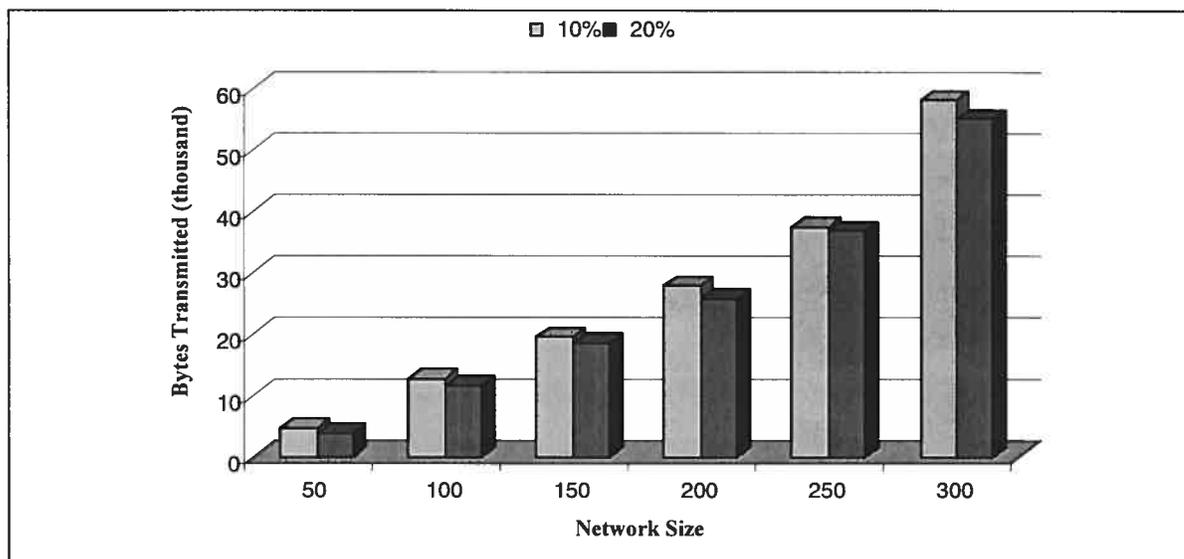


Fig.8 Traffic vs size with 10% and 20% Landmarks

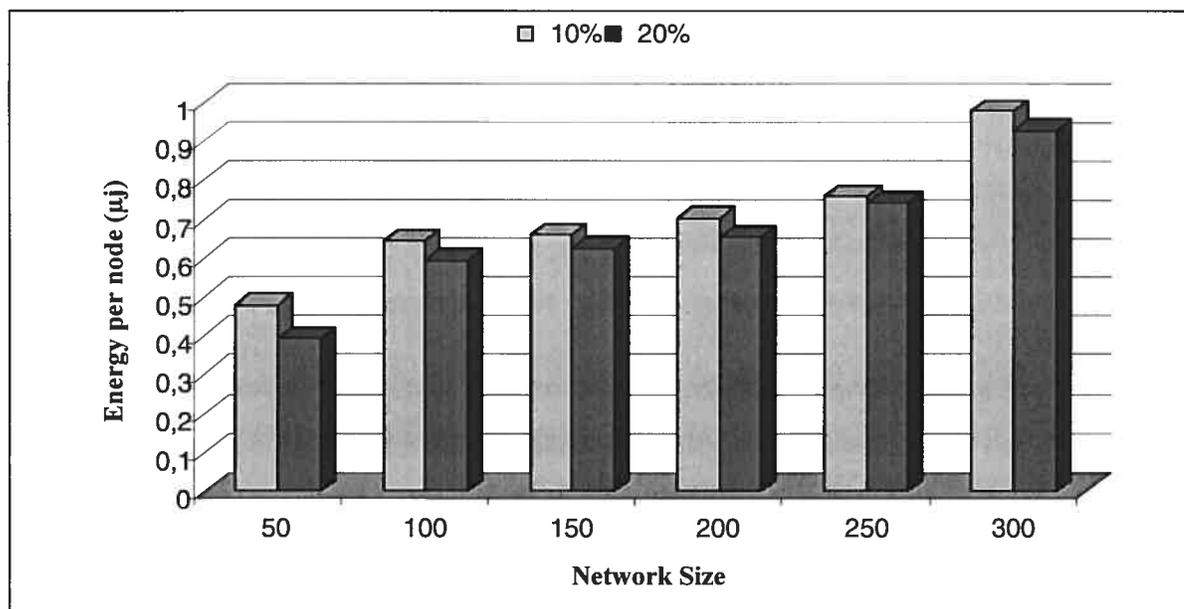


Fig.9 Average energy vs network size with 10% and 20% Landmarks

Fig. 10 shows the variation of the amount of traffic generated during the localization process with the percentage of landmarks in the network. The Figure shows that the number of transmitted bytes is inversely proportional to the number of Landmarks. This can be easily explained by the fact that increasing the number of landmarks in the network speeds up the convergence with smaller values of TTL. Indeed, in this case, most of the exchanged messages are of type *INIT* (rather than *POSITION*) that has far smaller size than *POSITION*. Comparing A2L with AHLoS approaches, A2L is still positioned between the distributed and the centralized approaches in term of energy consumption by radio transmission.

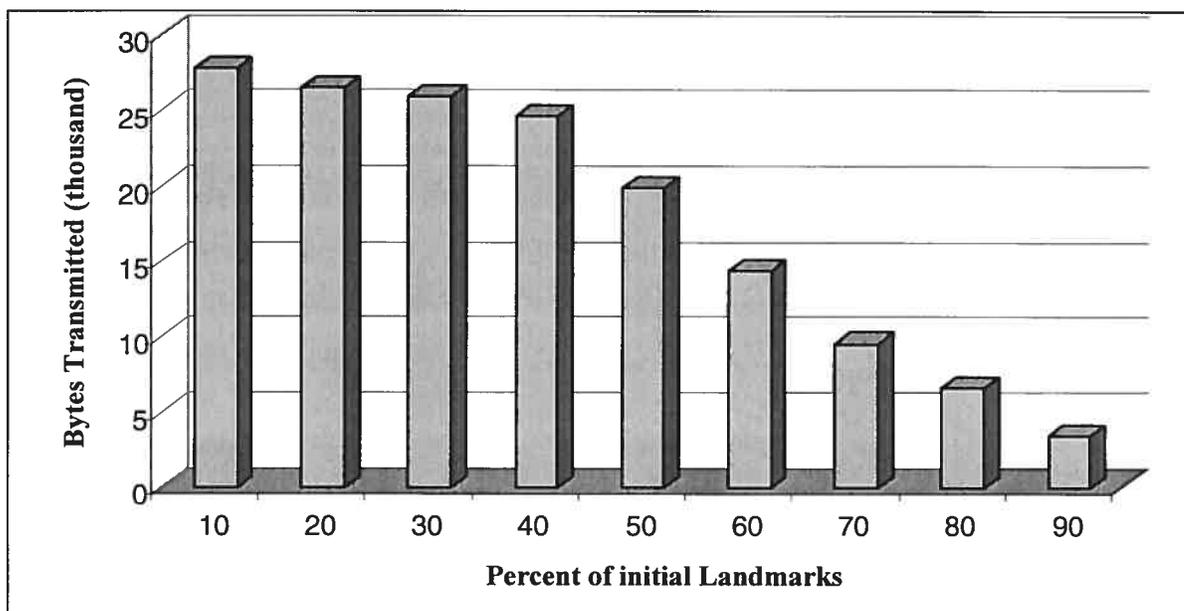


Fig.10 Traffic vs Landmarks in 200-nodes network

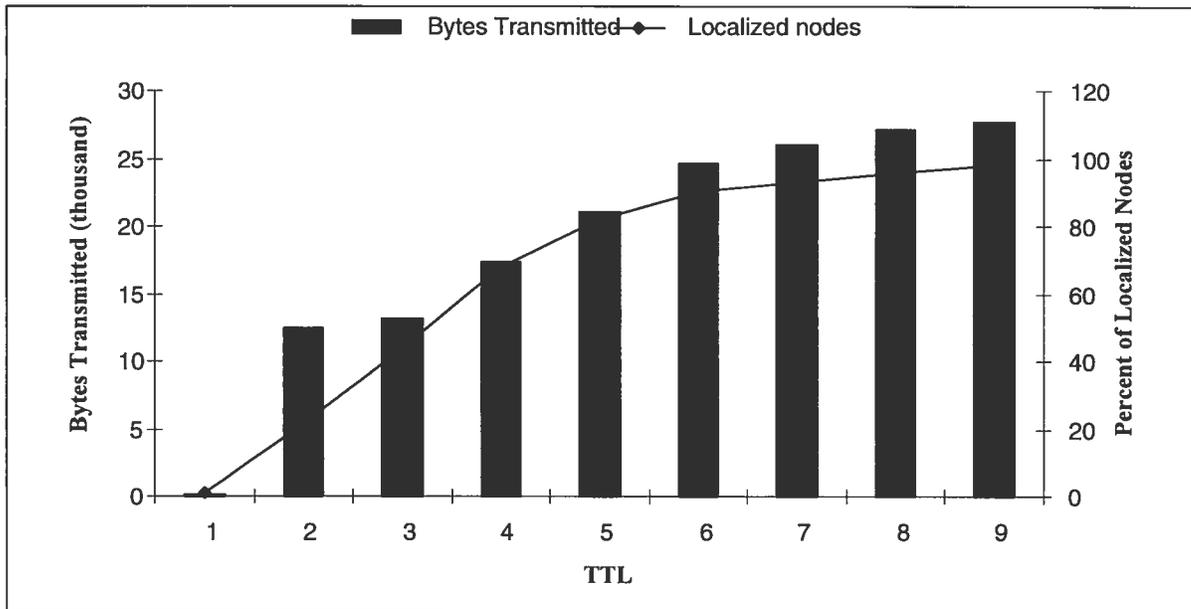


Fig.11 Traffic vs TTL vs localized nodes in 200-nodes network with 10% Landmarks

Fig. 11 shows the variation of the amount of traffic generated during the localization process with the value of TTL and the percentage of localized nodes; the results are as expected. For smaller values of TTL, the amount of generated traffic is smaller but the percentage of localized nodes is smaller too. For bigger TTL values, the amount of generated traffic is bigger and the percentage of localized nodes is bigger as well.

In the five set of simulations, like in [2, 10], a Gaussian distribution error is applied to AOA (with standard deviation as a parameter) and to distance measurement (with standard deviation and the radio range as parameters). Errors are normalized using the “real” positions of the nodes and the radio range (i.e., $\text{error} = [\text{Euclidian distance between the estimated position and the “real” position}] / (\text{radio range})$).

Since A2L uses the Least-Squares technique, we need to control the consistency of the resolution of the equations (4). Thus, we compute the residue [16]:

$$\text{Residue} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - \hat{x})^2 + (y_i - \hat{y})^2} - d_i}{n} \quad (5)$$

Where (\hat{x}, \hat{y}) is the estimated position. A large residue means that the set of equations used in the least-square is inconsistent. For achieving a high accuracy, we use a small threshold (i.e., if the residue exceeds the threshold, the estimated position is rejected) and we increase the TTL value.

We consider a network of 100 nodes in square area of 100x100; we set the value of the Gaussian distribution parameter to 5% for AOA and 5% and 14 for distances; the rate of landmarks to set to 10%. A2L presents a very good performance compared to APS (Fig. 12). A2L allows locating up to 75% of the nodes with 10% position error contrary to APS which locates 36% using DV-Distance [2] technique and 8% using AOA technique. A2L locates 99% of the nodes with a position error lower than 20%. APS, using DV-Distance, locates 99% of nodes but with a position error of 40% which may be not acceptable for a number of applications. Thus, A2L is definitively more precise than APS.

More details about the techniques we used, dealing with errors introduced by localization algorithms, and more simulations results will be published in another paper.

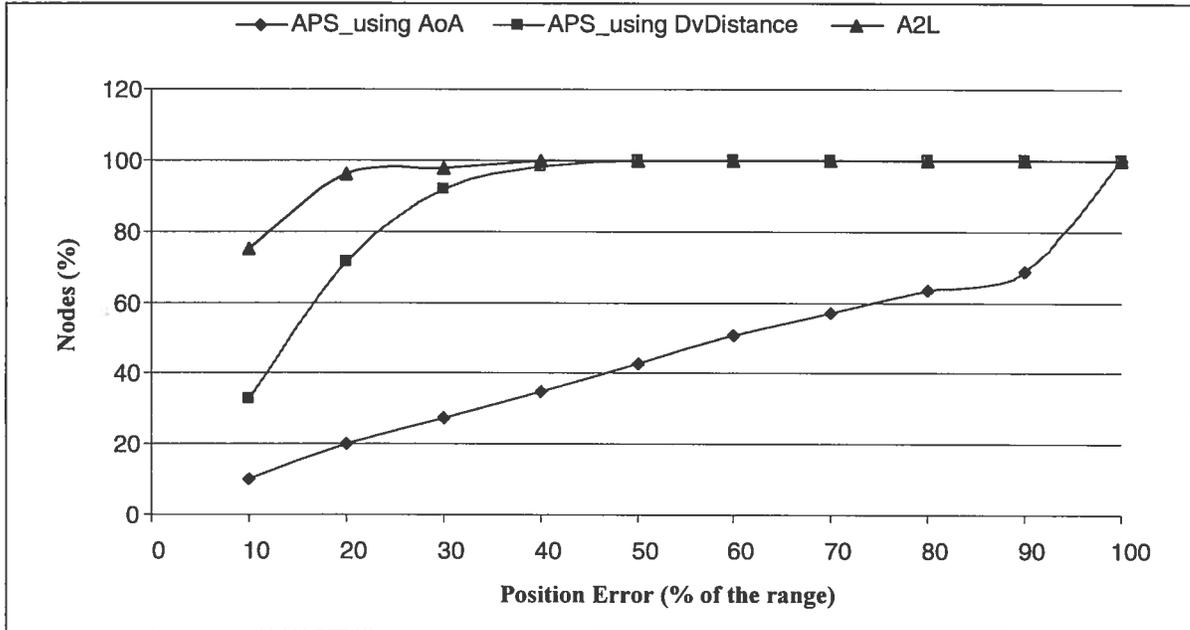


Fig.12 Accuracy measurement in 100 nodes networks

V. Conclusion

In this paper, we propose a new algorithm, called A2L, to locate a large number of nodes in wireless sensor networks where only a subset of them is composed of landmarks. A2L makes use of landmarks coordinates and AOA to compute the distance from a node to a landmark at a maximum of 2 hops away. Then, it uses trilateration to compute the node's position in the case it knows at least 3 landmarks which are 1 or 2 hops away from it.

Simulations show that A2L algorithm is more effective; it converges faster and locates more nodes. Compared to existing techniques, such as APS and AHLoS, A2L considerably increases the number of located nodes with better precision while using a smaller node degree and fewer landmarks

Currently, we are finalizing our study of positioning errors introduced by A2L and techniques to minimize them.

Acknowledgment

We would like to thank Dragos Niculescu and Badri Nath for providing us the APS code.

References

- [1] Tian He, Chengdu Huang, Brian M. Blum, John A. Stankovic, and Tarek Abdelzaher. Range-free localization and its impact on large scale sensor networks. *IEEE Personal Communications Magazine*, 2005
- [2] Dragos Niculescu and Badri Nath. Dv based positioning in ad hoc networks. *Journal of Telecommunication Systems*, 2003
- [3] Nirupama Bulusu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Gps-less low cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications Magazine*, 2000
- [4] B. Parkinson et al. Global positioning system: Theory and application. *Progress in Astronomics and Aeronotics*, volume I, 1996
- [5] Jeffrey Hightower and Gaetano Borriello. Location systems for ubiquitous computing. *IEEE Computer* 34(8) pp. 57-66, August 2001
- [6] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan. Radar: An in-building rf-based user location and tracking system. in: *INFOCOM 2000* pp.775-784, 2000
- [7] Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, and Hari Balakrishnan. The cricket location-support system. *International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, 2000
- [8] Nirupama Bulusu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Adaptive beacon placement. *The Twenty First International Conference on Distributed Computing Systems*, Phoenix, 2001
- [9] Srdan Capkun, Maher Hamdi, and Jean-Pierre Hubaux. Gps-free positioning in mobile ad-hoc networks. in *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2001

- [10] D. Niculescu and B. Nath, Ad hoc positioning system (APS) using AoA, In Proceedings of the 20st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM-22), April 2003
- [11] Savvides A., Han C., Strivastava B., « Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors », rapport, 2000, Department of Electrical Engineering
- [12] E. K. Wesel, Wireless Multimedia Communications: Networking Video, Voice and Data. Addition-Wesley, One Jacob Way, Reading Massachusetts 01867 USA, 1998
- [13] <http://nesl.ee.ucla.edu/projects/ahlos/hardware.htm>
- [14] A. Basu, J. Gao, J. Mitchell, G. Sabhnani, Distributed Localization Using Noisy Distance and Angle Information, 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc), 2006
- [15] Ahmed, A.A. Hongchi Shi Yi Shang, A New Hybrid Wireless Sensor Network Localization System, 2006 ACS/IEEE International Conference on Pervasive Services June 2006
- [16] K. Langendoen and N. Reijers. Distributed localization in wireless networks: A quantitative comparison. Computer Networks, no 43, pp. 500-518, 2003

Chapitre 4

Localisation des nœuds de capteurs dans un milieu avec erreurs

Mise en contexte

Dans ce chapitre, nous nous intéressons plutôt aux problèmes de localisations liés à la présence d'erreurs de mesures. Dans ce but, nous proposons un nouvel algorithme appelé HA-A2L qui est une extension de A2L. HA-A2L se base sur l'utilisation des distances, des angles d'arrivées et des coordonnées des ancres d'une part et sur le mécanisme d'échange d'information (messages INIT et POSITION) d'autre part.

Quand les erreurs de mesure sont prises en considération, le problème de la localisation devient plus complexe. En effet, ces erreurs peuvent influencer le calcul des positions des nœuds en diminuant ainsi la précision entre la position réelle et estimée de chaque nœud. Ces erreurs de positionnement peuvent donc être propagées à travers le réseau d'un nœud à un autre et deviennent ainsi cumulatives. Le protocole HA-A2L augmente ainsi d'une part le nombre de nœuds localisés grâce à une combinaison des techniques des moindres carrés et du centre de gravité. D'autre part, un mécanisme de contrôle d'erreurs a été implémenté afin de réduire leurs propagations à travers le réseau. Ce mécanisme définit une zone de confiance que chaque nœud peut maintenir, c'est-à-dire une zone où chaque nœud est susceptible d'exister.

Durant les simulations, nous étudions l'impact des erreurs de mesure, du nombre d'ancres et du degré des nœuds (le nombre de ses voisins) sur la précision (la distance entre la position réelle et la position estimée) et le taux de localisation afin de montrer l'efficacité du protocole HA-A2L. Ce dernier, que nous présentons dans ce qui suit, a été le sujet de l'article « HA-A2L: Angle to Landmark-based High Accuracy localization method in Sensor Networks » accepté pour publication dans la conférence ACM International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2007 (IWCMC [12]).

HA-A2L: Angle to Landmark-based High Accuracy localization method in Sensor Networks

M. Boushaba, A. Hafid

Network Research Laboratory, Université de Montréal
CP 6128 succ Centre-Ville
Montréal, QC, H3C 3J7, Canada
{boushamu, ahafid}@iro.umontreal.ca

A. Benslimane

Laboratoire Informatique Université d'Avignon
339 chemin des Meinajaries BP 1228-84911
Avignon Cedex 9, France
benslimane@lia.univ-avignon.fr

Abstract

In sensor networks, several applications such as habitat monitoring and moving objects tracking require the knowledge of nodes positions. Position estimation most often includes errors due to the measurements of distance and incoming angles between neighbors. Erroneous positions are propagated from a node to other nodes exacerbating the degree of errors in the estimation of the positions of these nodes. In this paper, we propose a new localization method, called HA-A2L. Compared, via simulations, to previous methods, such as APS and A2L, HA-A2L considerably increases the number of located nodes with far better accuracy.

Keywords- wireless sensor networks, localization, Angle of Arrival, trilateration, measurement errors.

I. INTRODUCTION

Sensor networks are becoming a standard technology in wireless communications. The development of these networks involves many different research areas, such as

communication, sensing and computing. This leads to smart disposable micro-sensors that can be deployed anywhere regardless of geographic limitations. Therefore, such sensors may be applied widely for serving different applications such as medical, environmental, military and national security. Usually, these networks use a large number of sensors able to communicate together in wireless mode and collaborate to provide information for common missions.

For a number of applications, sensors need to know their physical positions to determine where events occur (e.g., origin of a fire, position of a moving object). Sensor location can be computed using extra hardware, such as GPS (Global Positioning System); however, equipping each sensor node with GPS is very expensive in terms of energy and cost. A more acceptable solution would require only a subset of nodes equipped with GPS; the positions of the other nodes are computed using techniques, such as triangulation, trilateration, multilateration or both if distances and angles between pairs of neighbors are known.

Some of the GPS-based methods use estimated distance between pairs of neighbors. These methods are called Range-Based Localization Schemes (in contrast with Range-Free Localization Schemes [1, 2, 3]). The most popular methods are RSSI (Received Signal Strength Indicator), ToA/TDoA (Time of Arrival / Time Difference of Arrival) and AOA (Angle Of Arrival). In RSSI, nodes measure the power of the received signals and thus, can calculate the effective propagation loss. Theoretical or empirical models are used to translate this loss into distance. In ToA/TDoA, nodes directly translate the propagation time into distance if the signal propagation speed is known. The most basic localization system using ToA techniques is GPS [3]. In AOA, nodes estimate the angle at which signals are received and use simple geometric relationships to calculate their positions.

If we assume that the measurements of distances and angles between neighboring nodes are accurate, the process of localization becomes simple. However, in real life, these measurements (which are usually estimated by RSSI, ToA/TDoA or AOA techniques) can

be erroneous. The measurement errors are usually caused by the presence of obstacles, signal interference or variations in the propagation speed. In order to compute the position of node N , most of the existing localization schemes make use of the coordinates, if they are known, of neighboring nodes and distance/angle measurements. Since these measurements and the positions of neighbors can be erroneous, the coordinates of N will be skewed/erroneous. These coordinates, in turn, will be transmitted and used by other nodes for localization purposes. Thus, errors are aggregated exacerbating the degree of errors in the determination of the positions of these nodes. Indeed, a non-significant error (e.g., position of node N) transmitted in the network and used by other nodes for localization purposes, may become significant by the end of the localization process.

In this article, we propose a new localization method, called HA-A2L; it consists of: (a) a protocol, borrowed from A2L [10], that is used for the exchange of localization information between neighboring nodes; and (b) a localization algorithm that improves coverage (i.e., more nodes are localized) and produces highly accurate positions compared with existing methods. The localization algorithm uses two well-known techniques, namely least squares and gravity center to compute a node position. To control measurement errors, HA-A2L defines a confidence zone to which the node's coordinates likely belong.

HA-A2L is low cost and does not require expensive infrastructure. We use a fraction of the network nodes as landmarks allowing each node in the network to calculate its own position. Compared with previous methods, such as APS [9, 2] (using AOA and DV-Distance) and A2L, HA-A2L considerably increases the number of located nodes with better precision.

The paper is organized as follows. Section II presents related work. Section III describes the proposed algorithm. Section IV evaluates the performance of HA-A2L using simulations. Section V concludes the paper and presents future work.

II. Related work

A large number of existing techniques attempt to solve the localization problem. A detailed survey can be found in [4]. We identify four categories: (1) Infrastructure-based systems which require infrastructures like RADAR [5] or Cricket [6]; (2) Robot-based systems which use robots to locate nodes [7]; (3) GPS-free methods which do not require anchors to locate nodes [8]; and (4) GPS-based methods which use the positions of anchors (equipped with GPS) to determine estimated positions of non-anchor nodes. In this paper, we are concerned with the fourth category; there are several methods proposed in the open literature [2, 9, 10, 12, 13].

Ad-hoc Positioning System (APS) uses two techniques, namely DV-Distance [2] and Angle of Arrival (AOA) [9], which require knowledge of the distances and/or the incoming signals between a non-positioned node and Landmarks. Iteratively, nodes in APS obtain positions of neighboring nodes and angle orientation information starting from landmarks. When a non-positioned node knows at least three landmarks, it can apply trilateration to compute its position and its orientation to the landmarks. This information is broadcasted to neighbors for subsequent iterations.

To control measurement errors, APS uses a TTL-based (Time To Live) scheme. It limits the propagation of packets that includes localization information (e.g., positions of neighbors); and thus limits the propagation/accumulation of errors (TTL=2 means that a node, to compute its position, can use information from only nodes that are 2 hops away; APS uses also thresholds to control errors; more specifically, since small incoming angles are more prone to errors, measurement values of AOA that are smaller than a predefined threshold are rejected (i.e., not used in the localization process). To localize with a better accuracy, nodes compute the variance among many successive measurements of both the distance and AoA, and propagate the corresponding covariance matrix afterward. This matrix is used to increase the accuracy of a node's coordinates. A drawback of this method,

however, stems from the many pair wise transmissions needed to obtain a more precise estimation of the variance of range and angle measurements.

AdHoc Localization System (AHLoS) [13] is a localization system that produces high quality positions. To compute a node position, AHLoS uses a set of nodes initially configured as landmarks and applies atomic, iterative and collaborative multilateration [13]. To produce high quality (i.e., more accurate) positions, AHLoS uses least squares iterative multilateration. However, the authors admit that for large networks, improvements are still needed.

The main drawback of AHLoS is that it requires high percentage of landmarks to achieve high percentage of located nodes. For example, to compute the positions of 90 percent of non-positioned nodes with an average degree of 6.28, AHLoS requires a density of 45% landmarks. Moreover, AHLoS does not limit the propagation of localization information. Thus, errors will be propagated and accumulated/aggregated as the distance from landmarks increase.

Angle to Landmark method (A2L) [10] is AOA-based where each node computes the difference between two AOAs: incoming angles from neighboring landmarks and non-positioned neighbors. These angles are used to compute distances between nodes and landmarks within two hops. When a non-positioned node knows at least 3 landmarks which are 1 or 2 hops away from it, the node applies the least squares technique to compute its position. Since A2L uses the least squares technique, the authors define a residue as a metric to control the positioning accuracy. If the residue exceeds a threshold, the estimated position is rejected

To exchange localization information required to compute nodes' positions, A2L uses a protocol that defines two types of messages: *INIT* and *POSITION*. *INIT* contains the coordinates of the Landmarks; it is initially broadcasted (one time) by Landmarks to their immediate neighbors (one hop). *POSITION* is defined as: $\langle idS, CoordS, A2L_1, A2L_3, \dots \rangle$,

$A2L_n$, where idS is the identifier of the node which broadcasts the message, $CoordS$ are the coordinates (x,y) of the broadcasting node., and $A2L_k$ ($k = 1, \dots, n$) is a tuple that contains localization information such as distance, coordinates and angles formed between a landmark J , transmitter I and the receiver K of A2L messages.

When the distances and the incoming angles measurement between two neighbor's nodes contain noise, the localization problem becomes less accurate and may produce results that are far from the true positions of the network nodes. Since A2L present a good performance in term of coverage than APS and AHLoS, there is some case where the localization technique fails. It's the case when the pseudo-inverse matrix failed (see section III) and the case when we reject some located node having a residue that exceeds the threshold even if the estimated position is very close to the real position.

In this paper, we propose a new localization method, called HA-A2L, that considerably improves A2L; more specifically, we improve the coverage (i.e., locates more nodes), and the accuracy of the localization. Indeed, HA-A2L borrows, from A2L, the protocol (*INIT* and *POSITION*) used to exchange localization information, and defines a new localization algorithm.

III. HA-A2L

In this Section, we present the details of HA-A2L. The details of the protocol used to exchange localization information can be found in [10]; a brief introduction is presented in Section II. We start by defining the network and error models; then we describe the localization algorithm of HA-A2L.

A. Network Model

Let us consider an ad-hoc network R modeled by a bidirectional graph $G = (NR, E)$, where NR represents the set of sensor nodes and E the set of links between nodes. A link

between two nodes exists if each node is within the transmission range of the other. We partition the set of nodes into two subsets: (1) *NL*: the set of landmarks (i.e., nodes who know their positions using GPS for example); and (2) *NnL*: the set of non-positioned nodes. We assume that each A2L and HA-A2L node in *NnL* (e.g., Medusa node [11]) is able to measure its distance from its immediate neighbors and has an antenna array enabling it to compute the incoming signals angles (AOA).

B. Error Model

In a real deployment, the values of distances and angles measured by each *NnL* node can be erroneous. Thus, we associate to each incoming angle $\hat{\theta}$ and each distance \hat{d} measured a random value representing the error measurements:

$$\hat{d} = d \pm \varepsilon_d \quad \text{and} \quad \hat{\theta} = \theta \pm \varepsilon_\theta \quad (1)$$

Where d and θ are respectively the true distance and the incoming angle whereas ε_d and ε_θ are their measurement errors.

We assume that each HA-A2L node knows the τ value deviation percentage; this percentage is predefined as a network parameter. We define the distance deviation, Δd , as the multiplication of the measured distance and the ratio τ , and the angle deviation, $\Delta\theta$, as the multiplication of the measured incoming angle AOA and the ratio τ . Thus, for each node J from the *NnL* set, the true distance d_{IJ} to a neighbor I will be in the interval $[\hat{d}_{IJ} - \Delta\hat{d}_{IJ}, \hat{d}_{IJ} + \Delta\hat{d}_{IJ}]$ and the true incoming angle θ_{IJ} from I will be in $[\hat{\theta}_{IJ} - \Delta\hat{\theta}_{IJ}, \hat{\theta}_{IJ} + \Delta\hat{\theta}_{IJ}]$ interval, where \hat{d}_{IJ} and $\hat{\theta}_{IJ}$ are the measured distance and incoming angle respectively.

As mentioned before, when we take into account the measurement errors, the complexity of the localization process increases. For example, without any error control (e.g., by allowing bigger TTL values), positioning errors will be propagated throughout the network; thus, we will have more localized nodes but with more significant errors. Conversely, using smaller TTL values, positioning errors will be limited (i.e., not aggregated) but fewer nodes will be positioned.

Let V be the set of the localized nodes, i be its size and E_J be the positioning error for each node J in V (E_J is the distance between the estimated position and the true position). To locate the maximum number of nodes with best accuracy, we propose to resolve the following model formulation (i.e., objective functions) for a fixed TTL value:

$$\text{Maximize } i = (\text{size}(V)) \text{ and Minimize } ((\sum_{k=1}^i E_k)/i) \quad (2)$$

C. HA-A2L Localization Algorithm

To resolve (2), we execute three steps for each node in NnL : (1) determine its confidence zone (2) compute its position (3) decide to transmit or not the computed position.

i. Confidence zone

A confidence zone is an area where the node is more likely positioned. Node I receives a message (*INIT* or *POSITION*) from its immediate neighbor J (J is a Landmark) if I is in J 's coverage area. By estimating the distance \hat{d}_{ij} between I and J , I may produce two circles with J as the center and $\hat{d}_{ij} - \Delta\hat{d}_{ij}$ and $\hat{d}_{ij} + \Delta\hat{d}_{ij}$ as radiuses respectively. The space contained outside the smaller circle ($\hat{d}_{ij} - \Delta\hat{d}_{ij}$) and inside the bigger circle ($\hat{d}_{ij} + \Delta\hat{d}_{ij}$) represents the confidence zone (see Fig. 2).

For Landmark K , which is at two hops far from node I , the estimated distance between I and K will be in the interval $[\hat{d}_{MIN}, \hat{d}_{MAX}]$ where \hat{d}_{MIN} and \hat{d}_{MAX} are respectively the radiuses of the two circles centered in K (Fig. 1).

Assume that A and B are non-positioned nodes and L is a Landmark. When B receives a message *POSITION* from A and a message *INIT* from L , it estimates the three distances \hat{d}_{AL} , \hat{d}_{MIN} and \hat{d}_{MAX} using the distances and the incoming angles measured to A and L respectively. More explicitly, those distances are computed as follows:

$$\hat{d}_{AL} = \hat{d}_{BA} + \hat{d}_{BL} - 2 \cdot \hat{d}_{BA} \cdot \hat{d}_{BL} \cdot \cos(|\hat{\theta}_{BL} - \hat{\theta}_{BA}|) \quad (3)$$

$$\hat{d}_{MIN} = \hat{d}'_{BA} + \hat{d}'_{BL} - 2 \cdot \hat{d}'_{BA} \cdot \hat{d}'_{BL} \cdot \cos(|\hat{\theta}'_{BL} - \hat{\theta}'_{BA}|) \quad (4)$$

$$\hat{d}_{MAX} = \hat{d}''_{BA} + \hat{d}''_{BL} - 2 \cdot \hat{d}''_{BA} \cdot \hat{d}''_{BL} \cdot \cos(|\hat{\theta}''_{BL} - \hat{\theta}''_{BA}|) \quad (5)$$

Where, $\hat{d}'_{Bi} = \hat{d}_{Bi} - \Delta \hat{d}_{Bi}$ and $\hat{\theta}'_{Bi} = \hat{\theta}_{Bi} - \Delta \hat{\theta}_{Bi}$ for $i = A, L$

$\hat{d}''_{Bi} = \hat{d}_{Bi} + \Delta \hat{d}_{Bi}$ and $\hat{\theta}''_{Bi} = \hat{\theta}_{Bi} + \Delta \hat{\theta}_{Bi}$ where $i = A, L$

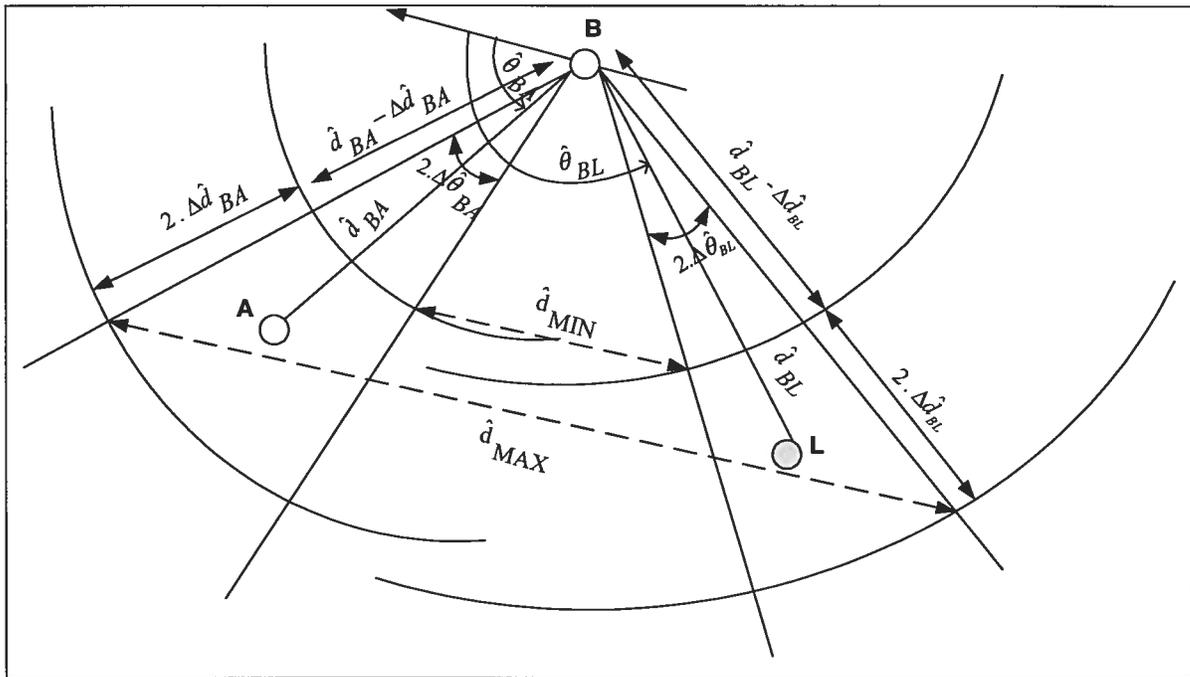


Fig.1 \hat{d}_{MIN} and \hat{d}_{MAX} separating Landmark at two hops

Thereafter, these distances will be sent, in a message POSITION, to node *A* which uses initially \hat{d}_{MIN} and \hat{d}_{MAX} to determine the two circles centered in *L*.

Let us assume that node *A* wants to determine its confidence zone *Z* (gray zone in Fig. 2); it uses the following equation:

$$Z = \left(\bigcap_{i=1}^n CZ'_i \right) \cap \left(\bigcap_{j=1}^m CZ''_j \right) \quad (6)$$

Where CZ' denotes the confidence zone formed by circles having each Landmark *I* as the center (*I* is an immediate neighbor of *A*, *C* and *D*), whereas CZ'' is the confidence zone formed by circles with Landmark *J* as the center (*J* is a two-hop neighbor of *A* and *L*).

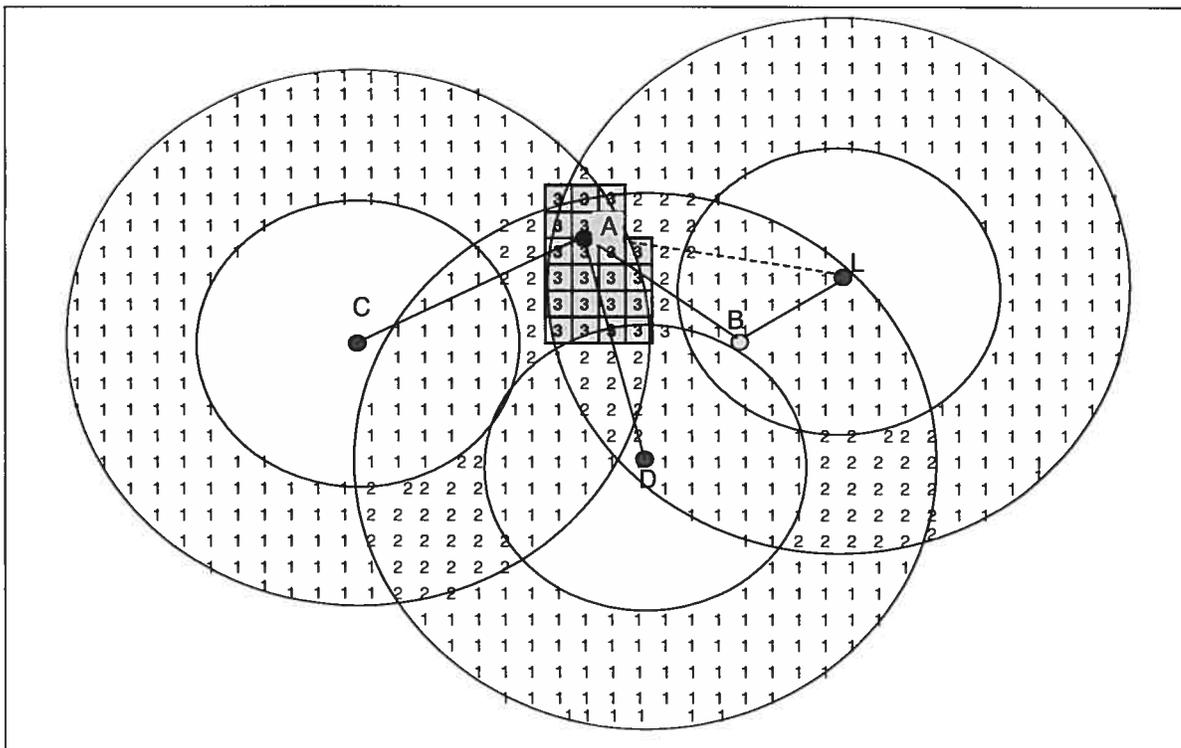


Fig. 2 Confidence zone

ii. Node position

In the following, we assume that we are in a 2-D space. (x,y) is the unknown position, and (x_i,y_i) are the coordinates of the i^{th} landmark for $i=1,\dots,n$. The coordinates and the estimated distance (\hat{d}_i), distance between the i^{th} landmark and (x,y) , are related by the following set of equations:

$$\begin{bmatrix} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{d}_1^2 \\ \vdots \\ \hat{d}_n^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

When range (\hat{d}_i in (7)) measurements are noisy, resolving different equations (lines in (7)) would not yield the same result. Accordingly, we solve the system above using the

least squares technique (8). It is a technique borrowed from linear algebra often used in applications that consists of over-determined system with noisy measurements. More formally,

$$X = (A^T A)^{-1} A^T \bar{b} \quad (8)$$

Where,

$A = (a_{ij})$ a $2 \times (n-1)$ matrix, i from 1 to 2 and j from 1 to $n-1$,

$a_{ij} = 2((2-i)(x_j - x_n) + (i-1)(x_j - y_n))$,

$\bar{b} = \left(\begin{matrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{n-1} \end{matrix} \right)$ where $b_i = x_i^2 - x_n^2 + y_i^2 - y_n^2 + \hat{d}_n^2 - \hat{d}_i^2$

To reach a best accuracy, we select landmarks (equipped with GPS or positioned nodes) who can take part in computing node position. This selection is based on the two following rules:

Rule1: Among n landmarks at one hop and m landmarks at two hops far from a node I (I is a non-positioned node) select k nodes from the n 1-hop landmarks (where $k \geq 3$), whenever possible, rather than from the m 2-hop Landmarks. The k nodes should respect rule 2 (see below). This choice is carried out for the simple reason that the estimated distance between I and a 2-hop landmark will likely be more erroneous. In fact, both distances and incoming angles, used to compute distances between I and landmarks at two hops, may be erroneous, whereas for the n 1-hop landmarks, we consider only the distances to compute the position of the node.

Rule2: Among n nodes (landmarks or nodes localized at the previous iterations), choose those which were localized with smallest TTL values. Note that, since localization errors are cumulative, therefore by using the nodes with smaller TTL values, we can reduce localization errors.

Let us note that when we apply the least squares technique, computing the pseudo-inverse matrix (8) may not be possible. However, we can solve this problem by assigning the coordinates of the gravity center of the confidence zone to the coordinates of the node:

$$(x,y) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right). \text{where } n \text{ is the set of points in the confidence zone.}$$

iii. Decide to transmit or not the computed position

When node I estimates its position using the least squares technique, the computed coordinates may be very different from that of the real position. This significant difference may be caused by the distance, angle, position errors, and/or the over-determined system (when the system (7) has more equations than variables). HA-A2L uses the following algorithm to limit the impact of erroneous positions on the localization process.

First, the node checks whether its coordinates, computed by the least squares technique belong to the confidence zone. If the response is no, then the coordinates are set to the coordinates of the gravity center of the confidence zone. The node computes the distance between itself and a point X in the confidence zone such that the distance is maximal. If this distance is smaller than a predefined threshold, the node constructs the corresponding POSITION message and transmits it in the network; otherwise, it considers itself non-positioned node and eventually tries to position itself in the next iterations (when receiving new POSITION messages)

Table 1 shows a pseudo-code of the algorithm executed by each non-positioned node when using HA-A2L.

Table. 1. HA-A2L Algorithm: process when node i receives a message POSITION.

Input: message POSITION

Output: the coordinates of node i and the message POSITION

Variables:

- $nb2L$ and nbL are the number of landmarks at two hops and at one hop from node i respectively

- TL and TN are Landmarks and neighbors tables respectively

Functions:

- *Receive (POSITION)*: it is used to check the HA-A2L fields in the message POSITION which are intended for node i and updates the Landmarks table (TL) that node i maintains.

- *selectBestLandmark(TL, TTL)*: it is used to select best Landmarks from TL table. The function return a set of landmarks

- *Positioning ((x,y), TL, TN)*: it is used to compute node position by applying a least-squares technique and builds message POSITION.

- *Broadcast (POSITION)*: it broadcasts the message POSITION to the neighbors of node i .*/

----- **Algorithm** -----

```

1 while (true){ Receive (POSITION)
2   Z=ConstructConfidence(TL);
3   best=selectBestLandmark(TL, TTL);
4   If (size(best)  $\geq$  3){
5     ( $x,y$ )=applyLeastSquare(best);
6     If (( $x,y$ ) = nil or ( $x,y$ )  $\notin$  Z) ( $x,y$ )=applyGravityCentre(Z);
7   } If (( $nb2L+nbL <$  3) or ( $\maxDistance((x,y), Z) <$  threshold)) ( $x,y$ ) = nil
8   POSITION = Positioning(( $x,y$ ), TL, TN) ;
9   Broadcast (POSITION);}

```

IV. SIMULATION

The objective of this section is to evaluate the performance of HA-A2L and compare it to APS. More specifically, we study the effect of measurement errors, Landmarks rate (i.e., percentage of the network nodes that know their positions) and node's degree (i.e., number of 1-hop neighbors) on the accuracy (i.e. Sum of the normalized position errors/the number of localized nodes) and the localization rate (percentage of non landmarks able to compute their positions). We compare HA-A2L with APS using AOA technique (which uses measurements of incoming angles and distances as with HA-A2L) and APS using DV-Distance (which only uses measurements of distances between neighboring nodes).

We developed our own JAVA-based simulator to perform this evaluation. We assume that all messages, broadcasted by nodes during simulation, are reliably delivered to their neighbors. We generate many random sensor network topologies according to the number of nodes and the number of landmarks; we use a square area (100x100) where nodes are randomly placed using a uniform distribution. Landmarks are selected randomly and nodes' degrees (average number of neighbors) are controlled by increasing the number of nodes. To simulate the distance and the incoming angle measurement errors between two neighboring nodes, we use a Gaussian distribution having a parameterized standard deviation and the true distance/AOA as the mean. To allow for easy comparison we normalize the position errors to the radio range (i.e., $\text{error} = [\text{Euclidian distance between the estimated position and the "real" position}] / (\text{radio range})$). For HA-A2L, we fixed the distance threshold to the farthest point in the confidence zone and the residue threshold to 8% of the range R . For APS, we fixed the incoming angles threshold to 0.15 (i.e., all incoming angles smaller than 0.15 are not used). We fixed the value of TTL to 10 to strike a balance between giving a chance to nodes far from Landmarks to compute their positions and limiting the accumulation/aggregation of errors when computing positions. This value was determined after running several simulations.

In the first set of simulations (Fig 3), we consider a scenario with 300 nodes and 10% of landmarks. We set the transmission range R to 14 and we execute HA-A2L, A2L and APS algorithms with different standard deviations for both incoming angle and distance measurements. Fig. 3 shows that HA-A2L locates nodes with a mean error smaller (especially, when the standard deviation is smaller than 40%) than A2L and APS for different values of standard deviations. When the deviation is 5%, the mean error is equal to 4%, 7%, 11% and 45% when using HA-A2L, A2L, DV-Distance and AOA respectively; thus, HA-A2L improves the localization accuracy by 3%, 7% and 41% compared to A2L, DV-Distance and AOA respectively. This improvement is explained, essentially, by the choice of Landmarks used in system (7). With a standard deviation of 40% or more, HA-A2L and APS using DV-Distance produce the same results. With a 40% mean error tolerance, the effects of initial error overshadow the number of initially used Landmarks sought for more accuracy. Thus it is necessary to increase the number of Landmarks.

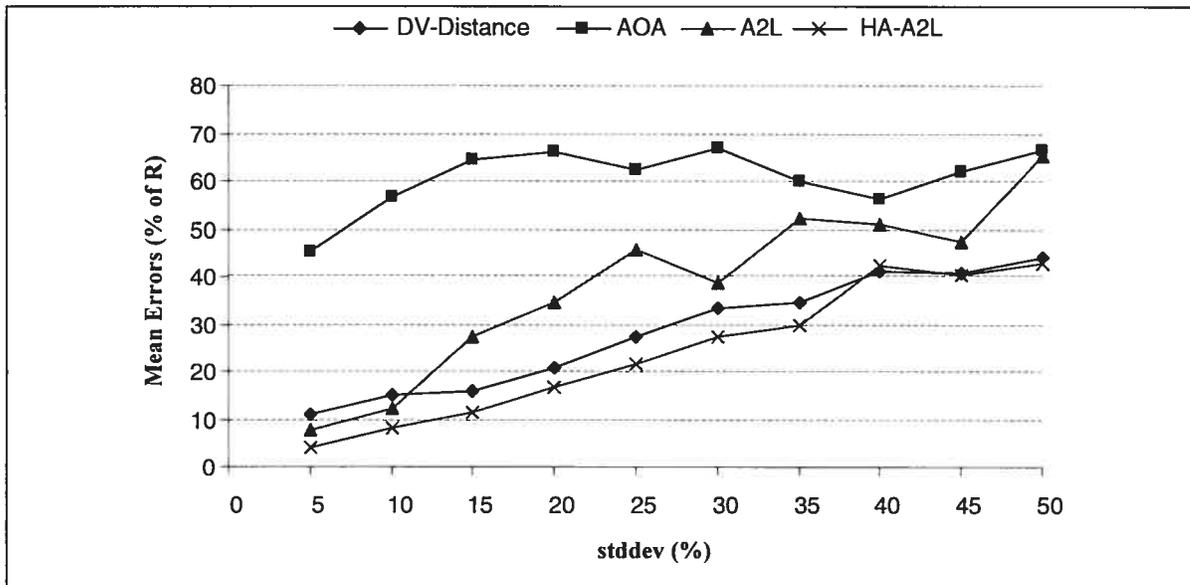


Fig.3 Standard deviation vs. mean error

In the second set of simulations, we study the impact of the Landmark rate on the localization rate and the accuracy; we use a network topology with 250 nodes and 10% as a standard deviation. The transmission range is fixed at 14. We vary the number of

Landmarks and we measure the localization rate (coverage) and the mean error generated when localizing non-positioned nodes. Figure 4 show that HA-2L and APS using DV-Distance localizes the same number of nodes ($\approx 100\%$) while they outperform APS using AOA and A2L. The high coverage provided by HA-A2L can be explained by the fact that we make use of the least squares techniques and gravity center of the confidence zone to compute positions. (i.e., if the computed coordinates are not in the confidence zone, then HA-A2L uses the coordinates of the gravity center of the confidence zone).

Fig. 5 shows the variation of the mean error with the rate of landmarks in the network. For 20% Landmark rate, the mean error is equal to 7% for HA-A2L, 13.5% for APS using DV-Distance, 47% for APS using AOA, 13.5% for A2L. When node degree is important, like in this topology, it is useless to use a high Landmarks rate to reach a good accuracy (and localization rate for that matter). To guarantee a 12% mean error, HA-A2L needs only 10% of nodes as landmarks while APS using DV-Distance requires 40% of nodes as landmarks to guarantee the same localization accuracy.

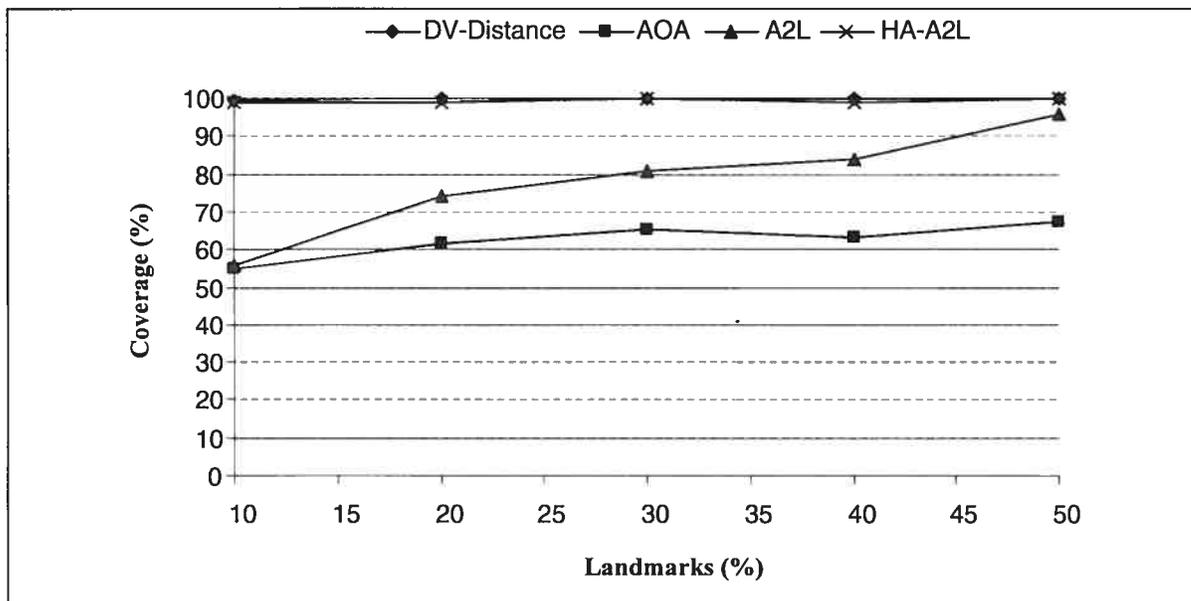


Fig.4 Coverage vs Landmarks

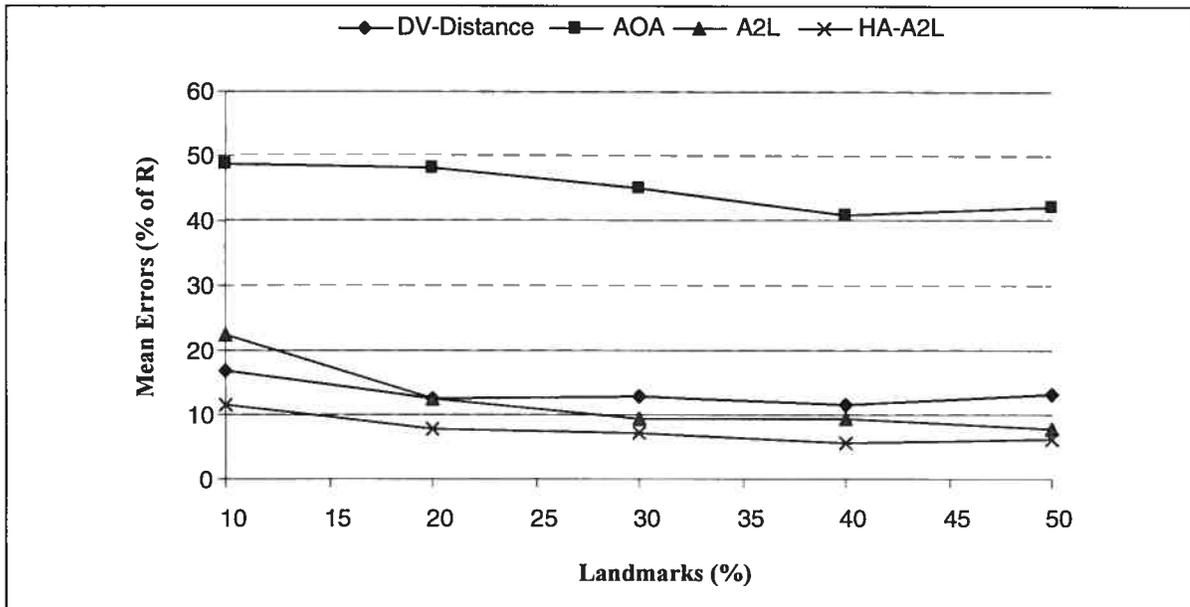


Fig.5 Mean errors vs Landmarks

In the third set of simulations, we study the relationship between the network size, localization rate and the mean error. We fix the transmission range to 14 and we vary the number of the nodes. Thus, by increasing the number of nodes in the same square area, we increase the average node degree. The Landmark rate used is fixed at 10% and the standard deviation at 5%.

Fig.6. shows that HA-A2L outperforms APS (DV-Distance/AOA) and A2L in terms of the localization rate. In 100-nodes network and 150-nodes network HA-A2L locates 76% and 91% respectively against 70% and 72% for APS using DV-Distance, 27% and 63% for APS using AOA and 30% and 71% for A2L. In a network with 200 nodes or more, HA-A2L and APS using DV-Distance reach 100% localization rate.

Fig. 7 shows the variation of the mean error with the network size. In 100-nodes network, HA-A2L locates nodes with a mean error of 6,5% against 61% for APS using DV-Distance, 15% for APS using AOA and 11% for A2L. The mean error decreases when the network size increases (except for APS using AOA); the mean error reaches 4.5% for HA-A2L and 11% for APS DV-Distance.

We conclude that HA-A2L makes possible to locate more nodes with less errors than APS (using DV-Distance/AOA) and A2L

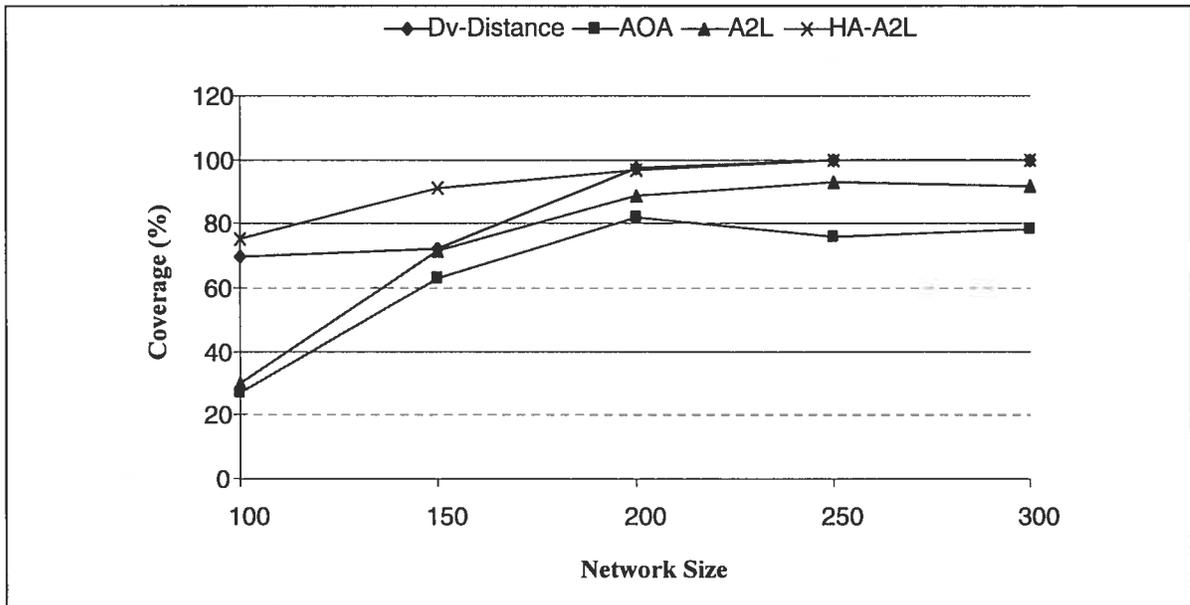


Fig.6 Coverage vs network size

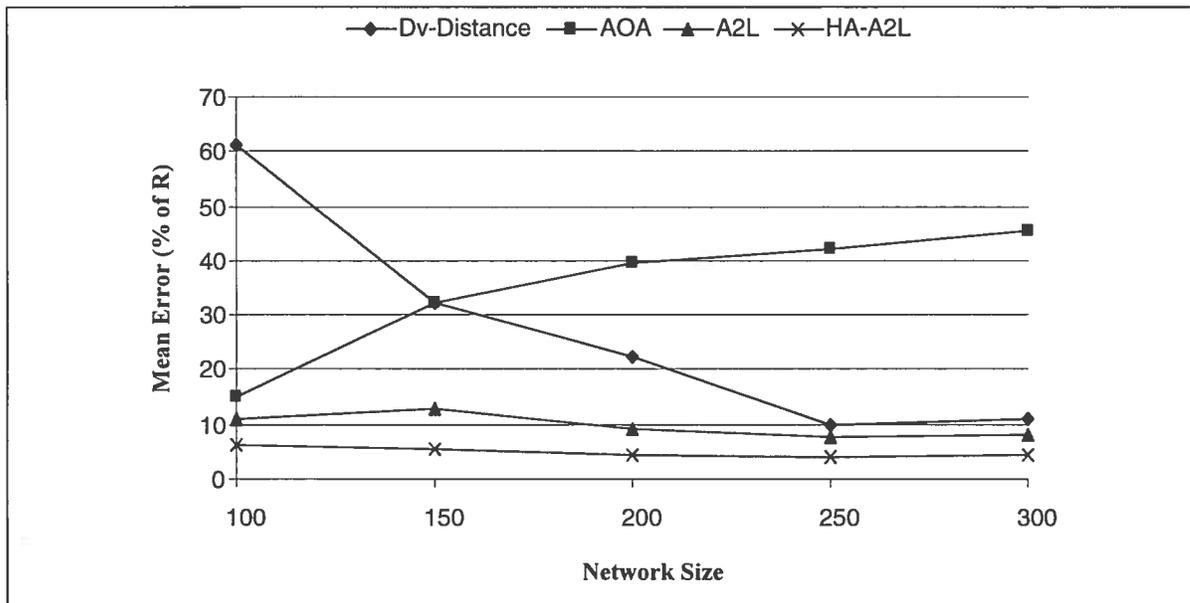


Fig.7 Mean error vs network size

In the fourth set of simulations, we study the impact in terms of accuracy on the localized nodes using the four algorithms: APS using DV-Distance/AOA, A2L and HA-A2L. We consider a network of 150 nodes. We set the standard deviation to Gaussian distribution at 5%. The rate of Landmarks is set to 10% and the transmission range at 18.

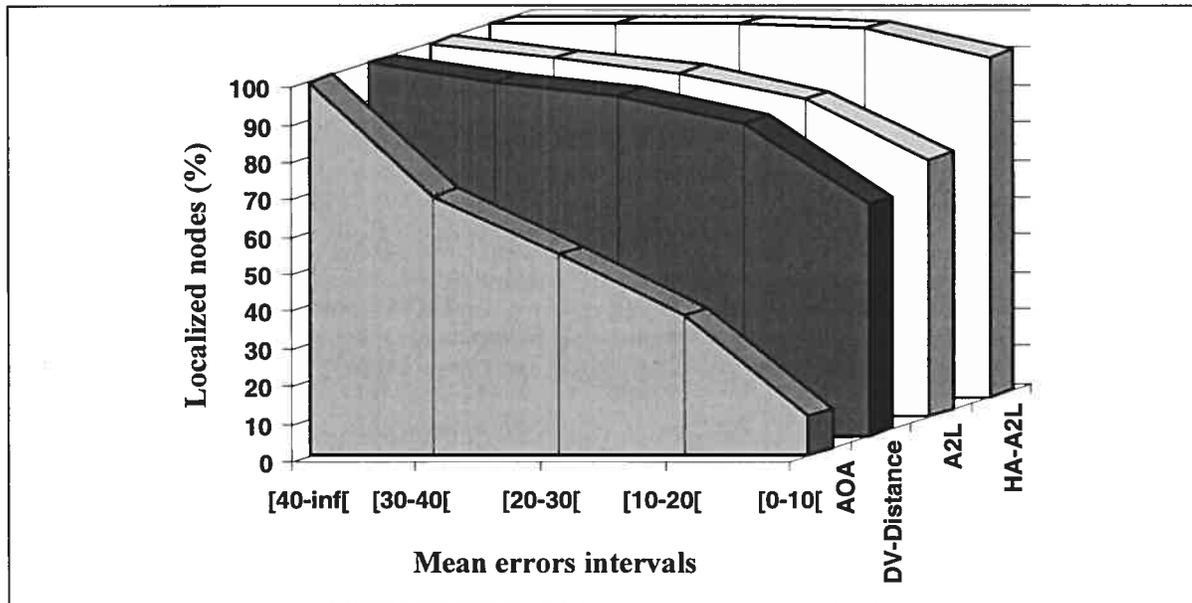


Fig.8 Accuracy measurement under different algorithms

Fig. 8 shows that HA-A2L presents a very good performance compared to APS (DV-Distance/AOA) and A2L. HA-A2L allows locating up to 91 % of the nodes with position mean error less than 10% contrary to 11% for APS using AOA, 62% for APS using DV-Distance and 68% for A2L. If we have the objective of locating 100% of the nodes, Fig. 10 shows that HA-A2L meets this objective with less than 20% of position mean error against 40% for APS using DV-Distance and more than 40% for APS using AOA which may be not acceptable for a number of applications. Thus, HA-A2L is definitively more precise/accurate than APS using DV-Distance/ AOA.

V. CONCLUSION

In this paper, we propose an extension of A2L [10], called HA-A2L, to locate a large number of nodes in wireless sensor networks with high accuracy. To provide better accuracy, we define a confidence zone; when a node computes its position (using trilateration), it checks whether it is inside the confidence zone. If the response is no, the coordinates of the gravity centre of the confidence zone is used.

Simulations show that HA-A2L outperforms existing methods; more specifically, compared to APS (using DV-Distance and AOA) and A2L, HA-A2L considerably increases the number of localized nodes with better precision in different network topologies and fewer landmarks. In the future, we plan to improve HA-A2L by using refinement techniques which we believe will improve further the localization accuracy.

Acknowledgment

We would like to thank Dragos Niculescu and Badri Nath for providing us the APS code. Also, we address our thanks to Saad Clément for valuable discussions

References

- [1] Tian He, Chengdu Huang, Brian M. Blum, John A. Stankovic, and Tarek Abdelzaher. Range-free localization and its impact on large scale sensor networks. *IEEE Personal Communications Magazine*, 2005
- [2] Dragos Niculescu and Badri Nath. Dv based positioning in ad hoc networks. *Journal of Telecommunication Systems*, 2003
- [3] B. Parkinson et al. Global positioning system: Theory and application. *Progress in Astronomics and Aeronotics*, volume I, 1996
- [4] Jeffrey Hightower and Gaetano Borriello. Location systems for ubiquitous computing. *IEEE Computer* 34(8) pp. 57-66, August 2001.
- [5] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan. Radar: An in-building rf-based user location and tracking system. in: *INFOCOM 2000* pp.775-784, 2000.

- [6] Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, and Hari Balakrishnan. The cricket location-support system. International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, 2000.
- [7] Nirupama Bulusu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Adaptive beacon placement. The Twenty First International Conference on Distributed Computing Systems, Phoenix, 2001.
- [8] Srdan Capkun, Maher Hamdi, and Jean-Pierre Hubaux. Gps-free positioning in mobile ad-hoc networks. in Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, 2001.
- [9] D. Niculescu and B. Nath, Ad hoc positioning system (APS) using AoA, In Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM-22), April 2003.
- [10] Mustapha Boushaba, Abderrahim Benslimane and Abdelhakim Hafid, A2L: Angle to Landmarks Based Method Positioning for Wireless Sensor Networks, 2007 IEEE International Conference on Communications Glasgow, Scotland, UK, June 2007,
- [11] <http://nesl.ee.ucla.edu/projects/ahlos/hardware.htm>
- [12] A. Basu, J. Gao, J. Mitchell, G. Sabhnani, Distributed Localization Using Noisy Distance and Angle Information, 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc), 2006
- [13] Savvides A., Han C., Strivastava B., « Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors », rapport, 2000, Department of Electrical Engineering

Chapitre 5

Conclusion et perspectives

5.1. Conclusion

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés aux problèmes majeurs de la localisation des nœuds de capteurs que l'on peut résumer en quatre points : la couverture, la précision de localisation, le coût de déploiement et l'énergie consommée. Nous avons présenté à cet égard deux solutions originales A2L et HA-A2L qui permettent aux nœuds initialement non positionnés de calculer leurs positions en se basant sur celles des ancrs voisines distantes non seulement à un saut mais également à deux sauts.

A2L et HA-A2L sont deux algorithmes distribués. Ils utilisent les distances, les angles d'arrivées et les coordonnées des ancrs pour permettre à chaque nœud de calculer sa propre position. Ces deux algorithmes reposent sur un même protocole de communication entre les nœuds. Ce protocole utilise deux types de paquets qui dépendent de la nature des nœuds qui les diffusent. Il s'agit notamment des messages INIT et POSITION diffusés respectivement par chaque ancre et chaque nœud (non équipé de GPS) dans le réseau. En se basant sur les données extraites des messages INIT et POSITION, un nœud peut se localiser par application d'une simple trilatération, s'il dispose d'au moins trois ancrs comme voisins directs, ou par combinaison d'une triangulation et d'une trilatération dans le cas où ces derniers sont distants à deux sauts.

Afin de localiser les nœuds avec une meilleure précision, A2L utilise la technique des moindres carrés pour estimer la position d'un nœud suivi d'une vérification à l'aide d'un résidu comme métrique pour décider de la consistance de la position calculée. Tandis que dans HA-A2L, chaque nœud exploite la marge d'erreur qui peut être ajoutée aux mesures prises sur les distances et les angles d'arrivées pour déduire une zone de confiance où le nœud est susceptible d'exister. Une estimation par moindres carrés ou par centre de gravité de la zone de confiance est utilisée pour qu'un nœud calcule sa propre position.

Nous avons démontré à l'aide des simulations que HA-A2L est plus efficace que A2L et les autres algorithmes de localisation dans la littérature notamment APS utilisant DV-distance et AOA. Cette efficacité se justifie par :

- Meilleur taux de localisation : HA-A2L localise plus de nœuds qu'A2L et les autres algorithmes. À l'aide d'une sélection entre une estimation de la position d'un nœud par moindres carrés ou par centre de gravité d'une zone de confiance HA-A2L a augmenté considérablement le nombre des nœuds localisés dans différentes topologies. De plus, un faible degré de connectivité est suffisant pour atteindre cet objectif;
- faible densité d'ancre : grâce au protocole de communication utilisé et à l'exploitation des coordonnées des ancres à deux sauts, le nombre d'ancres utiles pour assurer un meilleur taux de localisation a été réduit;
- meilleure précision : à l'aide du choix des ancres qui peuvent participer aux calculs des positions des nœuds, à la consistance des métriques de mesure des précisions ainsi qu'à l'utilisation du mécanisme de TTL permettant de limiter la propagation des erreurs, HA-A2L a réduit les erreurs de localisation.

5.2. Perspectives

Parmi les développements futurs de ce projet, nous prévoyons raffiner le calcul des positions des nœuds. Deux sources d'erreurs de localisation remarquables peuvent influencer le calcul de la position des nœuds. Il s'agit des erreurs de mesures et des erreurs dues à l'effet multi saut. Nous sommes persuadé qu'en combinant HA-A2L avec un mécanisme de correction des erreurs (de distance et de localisation), des résultats intéressants permettant de réduire les erreurs de localisation peuvent être obtenus. Un autre développement possible concerne le traitement de la mobilité des nœuds de capteurs. Certaines applications nécessitent la présence de capteurs mobiles comme dans le cas des

applications de dépistage des objets. Dans ce cas, lors du déplacement d'un nœud dans un réseau de capteur, une mise à jour permanente des coordonnées du nœud et de la disponibilité des informations est nécessaire. Le traitement devient plus complexe avec l'augmentation du nombre de nœuds mobiles dans un réseau. Il est donc intéressant d'étudier l'impact de la mobilité sur la précision et le taux de localisation dans un réseau ad hoc.

Bibliographie

- [1] P. Bahl et V. N. Padmanabhan, *Radar: An in-building RF-based user location and tracking system*. INFOCOM 2000 pp. 775-784, 2000.
- [2] A. Basu, J. Gao, J. Mitchell et G. Sabhnani, *Distributed Localization Using Noisy Distance and Angle Information*. 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc), 2006.
- [3] J. Beutel, *Handbook of sensor networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*. Chapitre *Location Management in Wireless Sensor Networks*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2005.
- [4] M. Boushaba, A. Benslimane et Abdelhakim Hafid, *A2L: Angle to Landmarks Based Method Positioning for Wireless Sensor Networks*. IEEE ICC, Glasgow, 2007.
- [5] M. Boushaba, A. Hafid et A. Benslimane, *HA-A2L: Angle to Landmark-based High Accuracy localization method in Sensor Networks*. Soumis à ACM Honolulu, Hawaii, 2007.
- [6] N. Bulusu, J. Heidemann et D. Estrin, *Adaptive Beacon Placement*, Proceedings of the Twenty First International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS-21), Phoenix, Arizona, 2001.
- [7] N. Bulusu, J. Heidemann, V. Bychkovskiy et D. Estrin, *Density-adaptive beacon placement algorithms for localization in ad hoc wireless networks*, UCLA Computer Science Department Rapport technique UCLA-CS-TR-010013, 2001.
- [8] N. Bulusu, J. Heidemann, et D. Estrin, *Gps-less low cost outdoor localization for very small devices*, IEEE Personal Communications Magazine, 2000.
- [9] S. Capkun, M. Hamdi, et J. P. Hubaux, *Gps-free positioning in mobile ad-hoc networks*, in Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, 2001.

- [10] L. Doherty, K. S. Pister, et L. E. Ghaoui, *Convex optimization methods for sensor node position estimation*, In Proceedings of IEEE INFOCOM '01, 2001.
- [11] L. Doherty, K. S. J. Pister, et L. E. Ghaoui, *Convex position estimation in wireless sensor networks*. Proceedings. IEEE INFOCOM, vol. 3, pp. 1655–1663, 2001.
- [12] <http://dropzone.tamu.edu/~xizhang/IWCMC07/IWCMC07.htm>
- [13] A. Hac, *Wireless Sensor Network Designs*, chapitre. *Applications of Wireless Sensor Networks*, John Wiley & Sons Press, 2003.
- [14] A. Harter, A. Hopper, P. Steggles, A. Ward, et P. Webster, *The anatomy of a context-aware application*. Proceedings of the MOBICOM'99, 1999.
- [15] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, et T. F. Abdelzaher, *Range free localization schemes in large scale sensor networks*, In Proceedings of ACM MobiCom '03, 2003.
- [16] J. Hightower, G. Boriello, et R. Want, *SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength*. Rapport technique 2000-02-02, University of Washington, 2000.
- [17] www.icc007.org
- [18] M. Mauve, J. Widmer et H. Hartenstein. *A survey on position-based routing in mobile ad hoc networks*, IEEE Network Magazine, 15(6):30–39, 2001.
- [19] A. Nasipuri et K. Li, *A directionality based location discovery scheme for wireless sensor networks*. Proceedings of ACM WSNA '02, 2002.
- [20] <http://nesl.ee.ucla.edu>
- [21] D. Niculescu and B. Nath, *Dv based positioning in ad hoc networks*, Journal of Telecommunication Systems, 2003.
- [22] D. Niculescu et B. Nath, *Ad Hoc Positioning System (APS) using AoA*. Proceedings of IEEE INFOCOM'03, San Francisco, CA, USA, 2003.
- [23] D. Niculescu et B. Nath, *Ad Hoc Positioning Systems (APS)*. Proceedings of IEEE GLOBECOM'01, 2001.

- [24] C. E. Palazzi, *Buddy-Finder: A Proposal for a Novel Entertainment Application for GSM*, 1st IEEE International Workshop on Networking Issues in Multimedia Entertainment (NIME'04), GLOBECOM 2004, Dallas, USA, 2004.
- [25] B. Parkinson et al., *Global positioning system: Theory and application*. Progress in Astronomics and Aeronautics, volume I, 1996.
- [26] N. Patwari, A. O. Hero, M. Perkins, N. S. Correal, et R. J. O'Dea, *Relative Location Estimation in Wireless Sensor Networks*. IEEE Transactions on Signal Processing, VOL. 51, NO. 8, 2003
- [27] J. Polastre. *Design and Implementation of Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring*. Master's thesis, University of California, Berkeley, 2003.
- [28] N. B. Priyanath, A. Chakraborty, et H. Balakrishna, *The cricket location support system*. Mobile Computing and Networking, 2000.
- [29] C. Savarese, J. Rabay and K. Langendoen, *Robust Positioning Algorithms for Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks*, USENIX Technical Annual Conference, Monterey, CA, 2002.
- [30] A. Savvides, C. Han et M. Srivastava, *Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors*. Proceedings of ACM MobiCom '01, pages 166-179, 2001.
- [31] A. Savvides, H. Park et M. Srivastava, *The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems*. Proceedings of ACM WSNA'02, 2002.
- [32] A. Savvides, W. L. Garber, R. L. Moses, et M. B. Srivastava, *An analysis of error inducing parameters in multihop sensor node localization*. IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 4, no. 6, pp. 567-577, 2005
- [33] Y. Shang, W. Ruml, Y. Zhang et M. Fromherz, *Localization from Mere Connectivity*, MobiHoc'03, 2003.
- [34] I. Stojmenovic, *Handbook of sensor networks: Algorithms and Architectures*. Wiley-Interscience, 2005 ISBN-13: 978-0-471-68472-5.
- [35] M. Thilliez et T. Delot, *A Localization Service For Proximity Applications*, Workshop on Mobile and Ubiquitous Information, Mobile HCI'03, Italie, 2003.

- [36] A. Ward, A. Jones, et A. Hopper, *A new location technique for the active office*, IEEE Personal Communications Magazine, 4(5), pp 42–47, 1997.
- [37] http://www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/MPR-MIB_Series_Users_Manual.pdf