



HAL
open science

Quelques contributions dans les réseaux de capteurs sans fil: Localisation et Routage

Clément Saad

► **To cite this version:**

Clément Saad. Quelques contributions dans les réseaux de capteurs sans fil: Localisation et Routage. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université d'Avignon, 2008. Français. NNT: . tel-00364914

HAL Id: tel-00364914

<https://theses.hal.science/tel-00364914>

Submitted on 27 Feb 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ACADÉMIE D'AIX-MARSEILLE
UNIVERSITÉ D'AVIGNON ET DES PAYS DE VAUCLUSE

THÈSE

présentée à l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

SPÉCIALITÉ : Informatique

École Doctorale 166 « I2S Mathématiques et Informatique »
Laboratoire d'Informatique (EA 4128)

*Quelques contributions dans les réseaux de
capteurs sans fil : Localisation et Routage*

par
Clément SAAD

Soutenue publiquement le 10 juillet 2008 devant un jury composé de :

M. Philippe MICHELON	Professeur, LIA, Avignon	Président
M. Eric FLEURY	Professeur, LIP - ENS, Lyon	Rapporteur
M. Jean-Frédéric MYOUP	Professeur, LaRIA, Amiens	Rapporteur
M. Jacques BLANC-TALON	DGA, Paris	Examineur
M. Jean-Claude KÖNIG	Professeur, LIRMM, Montpellier	Examineur
M. Abderrahim BENSLIMANE	Professeur, LIA, Avignon	Directeur de thèse
M. Marcelo DIAS DE AMORIM	Chargé de Recherche, LIP6, Paris	Invité



Laboratoire d'Informatique d'Avignon

Remerciements

Je tiens à remercier les personnes qui, dans leurs rôles, ont contribué à cette aventure scientifique et humaine qu'a représenté cette thèse.

Pour réaliser une thèse il faut, au-delà de la motivation, le goût d'apprendre et de faire apprendre avec toute la rigueur que cela exige. Cette vision que je me suis faite, je la dois à deux personnes qui, depuis mon stage de DEA, n'ont cessé de me transmettre leur passion pour leur métier : Ehoud Ahronovitz et Jean-Claude König. Tout au long de ces années, des liens d'amitié se sont tissés et même si, contrairement à Jean-Claude, Ehoud n'a pas été encadrant de ma thèse, il a toujours été un soutien.

Cette thèse fut encadrée également par mon directeur de thèse Abderrahim Benslimane que je remercie pour m'avoir proposé ce sujet.

Je remercie chaleureusement les membres du jury, Philippe Michelon en qualité de président du jury, Eric Fleury et Jean-Frédéric Myoupo qui ont eu la tâche d'évaluer mes travaux en tant que rapporteurs, et enfin Jacques Blanc-Talon et Marcelo Dias de Amorim.

Pour le cadre et l'ambiance qu'ils m'ont offert au cours de ces années, je remercie les membres de l'équipe APR et en particulier Julien avec qui j'ai étroitement collaboré sur la fin de ma thèse.

Je n'oublie pas l'ensemble des personnes qui m'ont rendu cette thèse agréable : Yolande, Nicolas, Maxime, Rémi, Gilles, et tous les autres.

Enfin, je remercie mes compagnons de route de la première heure Franck, Clément, Sabine, Romain, ma famille sans qui je ne serais pas arrivé jusque là et plus particulièrement Caroline qui pendant ma thèse m'a offert le plus beau des cadeaux.

Table des matières

1	Introduction	1
I	La localisation dans les réseaux de capteurs	5
2	Présentation générale	9
2.1	Les systèmes de localisation	9
2.2	Les technologies de mesure	11
2.2.1	Temps d'arrivée	11
2.2.2	Différence des temps d'arrivée	11
2.2.3	Puissance du signal	12
2.2.4	Angle d'arrivée	12
2.2.5	Conclusions	12
2.3	La localisation dans les réseaux statiques	12
2.3.1	Les méthodes libres de mesure	13
2.3.2	Les méthodes basées mesures	15
2.4	La localisation dans les réseaux mobiles	19
3	AT-Family : une famille de méthodes de localisation dans les réseaux statiques	21
3.1	Pré-requis	21
3.2	AT-Free : une méthode libre de mesure	23
3.2.1	Technique d'approximation	23
3.2.2	Gestion des diffusions	25
3.2.3	AT-Free en étape préliminaire	26
3.3	AT-Dist : une méthode basée mesures de distance	27
3.3.1	Technique d'approximation	27
3.3.2	Règles de localisation (MuR - Method using Rules)	29
3.3.3	MuR en étape préliminaire	34
3.4	AT-Angle : une méthode basée mesures d'angle	35
3.4.1	Localisation exacte	35
3.4.2	Technique d'approximation	35
3.5	Propriétés d'AT-Family	38
3.6	Implémentation	39
3.7	Discussions	41
3.7.1	Cercle parfait	41

3.7.2	Erreurs de mesure	42
3.8	Extension à la troisième dimension	43
3.9	Simulations	44
3.9.1	Environnement des simulations	44
3.9.2	Résultats	45
3.9.3	Discussion sur les simulations	52
3.10	Conclusion	52
4	ATM-Family : une extension vers la mobilité	55
4.1	Stratégie d'ordonnancement	56
4.1.1	SFR (Static Fixed Rate)	56
4.1.2	DVM (Dynamic Velocity Monotonic)	57
4.1.3	MADRD (Mobility Aware Dead Reckoning Driven)	57
4.1.4	Conclusion sur ces stratégies	58
4.2	ATM-Family	58
4.2.1	ATM-Free	59
4.2.2	ATM-Dist	60
4.2.3	ATM-Angle	61
4.2.4	Propriétés et implémentation	62
4.2.5	Adaptation des stratégies d'ordonnancement	63
4.3	Simulations	64
4.3.1	Environnement des simulations	65
4.3.2	Résultats	65
4.4	Conclusion	69
II	Le routage dans les réseaux de capteurs	75
5	Présentation générale	79
5.1	Le routage géographique dans les réseaux statiques	81
5.1.1	Les algorithmes Greedy	82
5.1.2	Routage par faces (Face routing)	83
5.1.3	GFG (Greedy-Face-Greedy)	84
5.1.4	Power Progress	84
5.2	Le routage géographique dans les réseaux mobiles	84
6	EEG-Routing : Routage Géographique Efficace en Energie	87
6.1	Pré-requis	87
6.2	Modèle énergétique et rayon d'émission optimal	88
6.3	Définition de la métrique	90
6.3.1	Calcul de la probabilité de communication	90
6.3.2	Ratio entre la consommation d'énergie et le progrès	93
6.3.3	Calcul du coût d'un arc	94
6.4	EEG-Routing	95
6.4.1	Avant le déploiement	95
6.4.2	Après le déploiement	95

6.4.3	Elimination des boucles	98
6.4.4	Tolérance aux pannes et aux apparitions de capteurs	98
6.5	Simulations	99
6.5.1	Environnement des simulations	99
6.5.2	Résultats	99
6.6	Conclusion	101
7	Ellipse-Routing : Une technique de routage dans les réseaux mobiles	103
7.1	Routage probabiliste dans une ellipse	103
7.1.1	Principe de la méthode	103
7.1.2	Résultats des simulations	105
7.1.3	Analyse de ces simulations	106
7.2	Calcul du couple <i>rayon d'émission - facteur de l'ellipse</i>	107
7.2.1	Calcul analytique	107
7.2.2	Résultats des simulations	108
7.3	Gestion des erreurs de position	112
7.3.1	Erreur de position de la source	112
7.3.2	Erreurs de position des nœuds restants	113
7.3.3	Résultats des simulations	117
7.4	Conclusion	118
8	Conclusion et perspectives	121
8.1	Conclusion	121
8.2	Perspectives	122
	Liste des illustrations	125
	Liste des tableaux	129
	Bibliographie	131

Chapitre 1

Introduction

Dans les premiers âges de l'informatique, la difficulté pour les chercheurs était d'adapter les différents algorithmes aux contraintes matérielles imposées par les ordinateurs (puissance de calcul, mémoire limitée, ...). Même si ces difficultés n'ont pas disparu, leurs impacts tendent à diminuer tant la puissance des ordinateurs s'accroît à une vitesse surprenante. Il faut des applications telles que la cryptographie, les analyses ADN en bio-informatique, la fouille de données, ... pour redonner vie à ces limites imposées par le matériel. Toutefois, les avancées technologiques conduisent à une nouvelle évolution du paradigme.

Incontestablement, ce début de vingt et unième siècle est placé sous le signe de la communication. Après le phénomène Internet, la démocratisation des technologies sans fil révolutionne les moyens de communication avec notamment l'apparition de réseaux spontanés ou réseaux ad hoc. L'hétérogénéité de ces réseaux et l'absence d'infrastructure accroissent leurs intérêts et ouvrent de nouvelles perspectives avec, par exemple, l'émergence de réseaux mobiles.

Autre événement majeur de l'informatique, la décomposition et la répartition des calculs sur plusieurs machines a permis d'outrepasser les limites des processeurs. En effet, pourquoi se limiter à une seule et même unité de calcul ? Dès lors qu'un calcul peut se décomposer, sa résolution sera d'autant plus rapide que le nombre d'unités de calcul sera élevé.

Enfin, indépendamment de ces avancées technologiques et algorithmiques, il existe une tendance dans le domaine des micro-systèmes électroniques qui s'est accentuée ces dernières années : il s'agit de la miniaturisation.

C'est dans ce contexte qu'apparaît une nouvelle génération d'appareils : les capteurs communicants. Ils sont généralement de petite taille, dotés d'une unité de calcul et capables de communiquer entre eux. On parlera alors de réseaux de capteurs. Les fonctionnalités des capteurs étant limitées de par leurs faibles ressources, les applications doivent être adaptées à leurs caractéristiques. L'émergence de ce nouveau champ d'étude va pousser les informaticiens à retourner aux sources de leur histoire ...

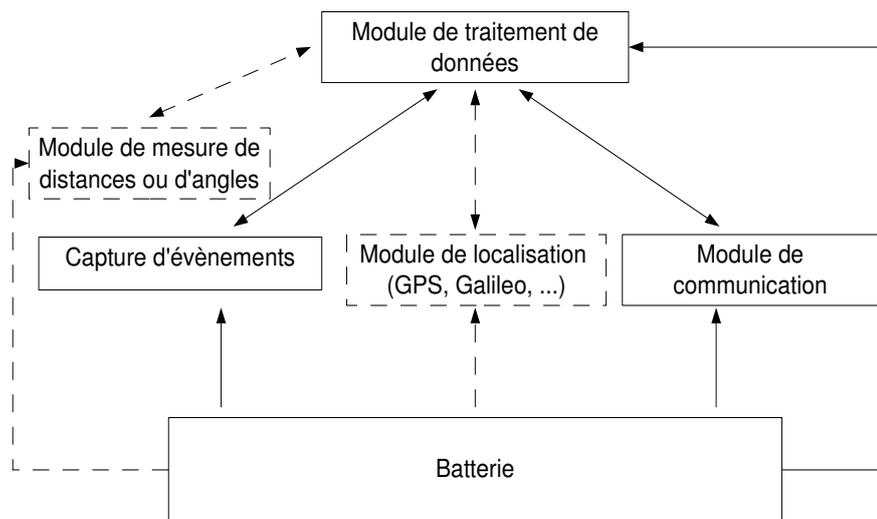


FIG. 1.1: Architecture d'un capteur

La tâche première d'un capteur est de détecter un événement (par exemple, un changement de température, des mouvements, des vibrations, ...). Il est donc capable de récolter des données relatives à son environnement, de les traiter, puis, si nécessaire, de les communiquer à des capteurs voisins via un médium sans fil.

S'il existe différents types de capteurs, leur fonctionnement reste le même. L'architecture d'un capteur, représentée en figure 1.1, se résume ainsi :

- un module de capture : il détecte les événements ayant lieu dans son rayon de perception ;
- un module de traitement : doté d'un processeur et d'une mémoire, il traite les données détectées et éventuellement les communique ;
- un module de communication : il se charge de la transmission et de la réception des données via un médium sans fil ;
- un module de localisation (optionnel) : il peut s'agir d'un système GPS (Parkinson et al, 1996), Galileo (CNES et ESA) ou d'un autre système de localisation qui donne au capteur sa position exacte ;
- un module de mesure (optionnel) : il mesure la distance ou l'angle avec un capteur voisin ;
- une batterie : elle alimente tous les autres modules.

Les interactions entre ces modules sont illustrées en figure 1.1. Chacun d'entre eux est alimenté par la batterie. La consommation d'énergie est essentiellement due aux modules de communication sans fil et de traitement des données. Le module optionnel de localisation est également une source de consommation d'énergie non négligeable. Pour prolonger la *durée de vie* des réseaux de capteurs, il est donc indispensable de minimiser les calculs et les communications. Ces contraintes majeures doivent être prises en compte par les méthodes proposées pour ce type de réseau. La figure 1.2 est un exemple de capteur alimenté par deux piles.



FIG. 1.2: Exemple de capteur

Le déploiement de ce type d'appareils forme alors un réseau qui peut être utilisé dans des domaines militaires (par exemple, le suivi de déplacement des troupes ennemies), civils (la détection de feux de forêt), médicaux (le suivi des patients), animaliers (l'étude des migrations d'espèces), ... Dans plusieurs exemples, les capteurs sont mobiles. Il faut donc distinguer deux types de réseaux : les réseaux statiques et les réseaux mobiles.

Si leurs perspectives d'utilisation sont claires et attrayantes, les problématiques qu'engendrent ces réseaux n'en sont pas moins nombreuses. A priori, ils ne dépendent d'aucune infrastructure et les capteurs n'ont aucune information relative au réseau auquel ils appartiennent. De plus, étant construits de façon ad hoc, ces réseaux doivent être auto-organisés. Parmi les problèmes cruciaux, deux d'entre eux peuvent être cités :

- celui de la localisation : il s'agit d'attribuer une position géographique (exacte ou estimée) aux capteurs ; une application telle que la surveillance des feux de forêt, par exemple, n'aurait pas de sens sinon.
- celui du routage : il consiste à acheminer un message d'un capteur vers un autre. Souvent, les réseaux contiennent une station de base chargée de collecter l'ensemble des informations perçues par les capteurs. Il s'agit alors de transmettre ces informations point à point vers cette station de base.

Bien d'autres problèmes tels que l'adressage ou la diffusion sont liés à ce type de réseau. Chaque méthode proposée doit assurer l'auto-stabilisation du réseau en garantissant la convergence vers une solution stable. D'autre part, l'énergie des capteurs étant limitée, cette contrainte doit être prise en compte afin d'allonger la durée de vie du réseau.

Cette thèse propose des solutions aux problèmes de la localisation et du routage dans les réseaux de capteurs statiques et mobiles.

Elle se décompose en deux parties traitant successivement de ces deux problématiques. Chacune d'elles est étudiée d'abord en considérant des réseaux de capteurs sta-

tiques puis mobiles.

La première partie, consacrée au problème de la localisation, considère un ensemble de capteurs dont certains sont équipés d'un module de localisation. Elle propose une famille de trois méthodes, nommée AT-Family, dont le but est d'attribuer aux capteurs des positions les plus précises possibles. Chaque méthode est définie selon le cas où les capteurs n'ont pas de module de mesure, sont équipés d'un module leur permettant de mesurer les distances avec leurs voisins ou enfin d'un module de mesure d'angles. Elles attribuent à chaque capteur une position exacte lorsque c'est possible ou bien estimée ainsi qu'une borne d'erreur de sa position. Ensuite, une extension de cette famille de méthodes, nommée ATM-Family, est proposée pour le problème de la localisation dans les réseaux de capteurs mobiles.

La seconde partie est dédiée au problème du routage. Souvent dans ce type de réseau, les techniques de routage se basent sur les positions des capteurs : on parle alors de *routage géographique*. Généralement, ces méthodes s'appuient sur des positions exactes ; or, dans la pratique, ces dernières ne sont pas précises. Cette partie présente deux méthodes EEG-Routing et Ellipse-Routing pour les réseaux de capteurs respectivement statiques et mobiles. Toutes deux considèrent des capteurs dont les positions sont estimées et leurs bornes d'erreurs de positions connues. Elles sont donc compatibles avec les techniques de localisation décrites dans la première partie. L'objectif de ces méthodes est de maximiser le taux d'acheminement des messages tout en minimisant la consommation d'énergie.

Première partie

La localisation dans les réseaux de capteurs

Cette partie traite du problème de la localisation dans les réseaux de capteurs. Une famille de trois méthodes, nommée AT-Family, est proposée dans le cadre des réseaux statiques. Chaque méthode tient compte des capacités de mesure des capteurs. En effet, ils peuvent être dotés de technologies destinées à mesurer les distances ou les angles qu'ils forment avec leurs voisins. Même imprécises, ces données apportent des informations de localisation. Les méthodes présentées sont nommées AT-Free, AT-Dist et AT-Angle : elles considèrent respectivement des capteurs qui n'ont aucune capacité, peuvent mesurer les distances et enfin les angles avec leurs voisins. D'autre part, elles supposent qu'un certain pourcentage de capteurs sont localisés exactement (par exemple via les modules de localisation GPS, Galileo, ...).

Une extension de cette famille de méthodes aux réseaux mobiles, nommée ATM-Family, est ensuite proposée. Elle se compose des méthodes ATM-Free, ATM-Dist et ATM-Angle qui sont confrontées à un problème supplémentaire puisque les capteurs ne peuvent, de par les contraintes énergétiques, calculer leurs positions de façon continue pour maintenir un niveau de précision élevé. Des stratégies d'ordonnement des dates auxquelles les capteurs invoquent le calcul de leurs localisations ont été élaborées afin d'assurer un compromis entre la consommation d'énergie et la précision des positions.

L'ensemble de ces méthodes de localisation attribue des positions exactes ou estimées aux capteurs. Cependant, lorsqu'un capteur obtient une position estimée, les méthodes lui fournissent une borne de son erreur de position. Ainsi, il peut déduire si sa position estimée est proche de sa position réelle et, le cas échéant, contribuer à la localisation des autres capteurs. De plus, grâce à ces mêmes informations, les capteurs sont en mesure d'éliminer de fausses informations de localisation. Ces deux propriétés sont déterminantes quant à la précision des positions attribuées.

Chapitre 2

Présentation générale

Dans bon nombre d'applications, un événement détecté par un capteur n'est utile que si une information relative à sa localisation géographique est fournie. C'est le cas de la surveillance des feux de forêt ou de troupes ennemies dans un contexte militaire. Sans cette information, ces applications n'auraient aucun sens. Il s'agit donc de déterminer pour chacun des capteurs sa position. La localisation des capteurs est un des principaux problèmes dans ce type de réseaux et nombreuses sont les solutions qui ont été proposées pour le résoudre, chacune faisant des hypothèses diverses sur les capacités des capteurs.

Ce chapitre présente le contexte dans lequel s'inscrit le problème de la localisation dans les réseaux de capteurs. Il propose un descriptif du principe de localisation par satellite avant de s'intéresser aux techniques qui permettent aux capteurs de mesurer les distances ou les angles qu'ils forment avec leurs voisins. Enfin, il fait un rappel des principales méthodes qui ont été proposées pour résoudre le problème de la localisation.

Les deux modules optionnels, qui composent l'architecture d'un capteur présentée dans le chapitre précédent, s'avèrent très utiles pour résoudre le problème de la localisation. En effet, ils apportent des informations pertinentes comme la position exacte de certains nœuds pour le module de localisation ou bien des données relatives aux distances ou aux angles pour le module de mesure.

2.1 Les systèmes de localisation

Si autrefois les systèmes de localisation étaient exclusivement réservés aux applications militaires, ils se sont ouverts depuis les années 90 au monde civil. Les grandes puissances ont toutes cernées les impacts politiques et économiques de ces systèmes.

Le GPS (Global Positioning System) ([Parkinson et al, 1996](#)) est le système de localisation américain. Opérationnel depuis les années 1980, il a été développé pour fournir

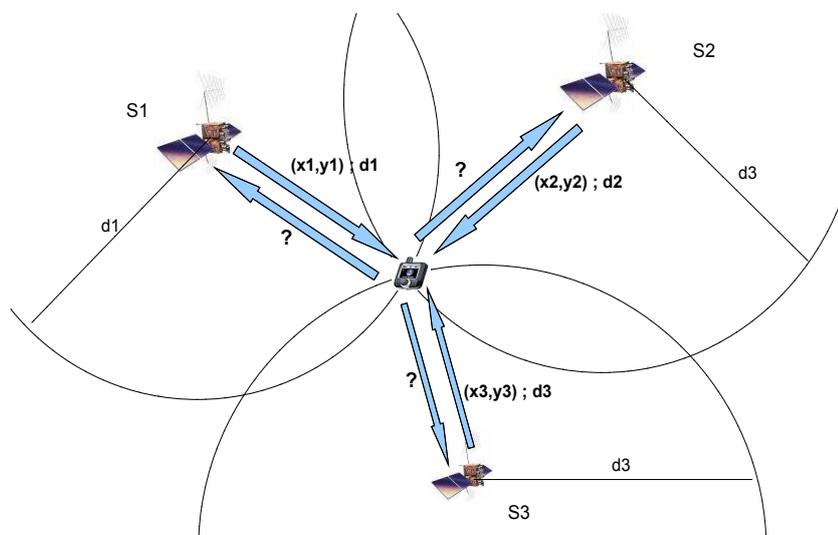


FIG. 2.1: Principe des méthodes de localisation par satellite (en 2D)

à l'armée américaine un système de repérage à couverture mondiale et de très grande précision. Son rôle consiste, par exemple, à guider un missile sur des centaines de kilomètres. C'est à la fin de l'année 1993 que le département américain de la défense a ouvert l'accès gratuit au GPS pour les utilisateurs civils.

Le système russe GLONASS (IAC), développé de 1976 à 1982, n'est plus pleinement opérationnel et ce dû aux conditions politiques et économiques du pays. Toutefois, la Russie a entrepris sa remise à niveau et GLONASS devrait être de nouveau fonctionnel en 2011.

De son côté, l'Inde met en œuvre son système IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System). Il offrira une précision au sol inférieure à 20 mètres et devrait être prêt en 2012.

Le système Beidou développé par la Chine en est à une version expérimentale (Beidou-1). Elle est composée de quatre satellites ayant des fonctionnalités limitées. La version Compass (ou Beidou-2) devra compter 35 satellites opérationnels d'ici 2010 ou 2011.

Enfin, Galileo (CNES et ESA) est le système de localisation européen. Il est composé de 27 satellites et atteindra une précision inférieure au mètre pour les applications du domaine civil.

Il faut savoir également que dans certains cas (notamment militaires) la précision de ces systèmes atteint le millimètre.

Le principe général de ces technologies, illustré en figure 2.1, se décrit comme suit. Des satellites dédiés gravitent autour de la terre. Lorsqu'un module de localisation demande sa position, chaque satellite lui communique ses coordonnées et la distance qui le sépare de lui (cette distance est mesurée via la technologie ToA expliquée ci-après).

Au moins trois satellites sont nécessaires pour une localisation dans la deuxième dimension, alors qu'au moins quatre le sont pour la troisième. Le module applique alors la *multilatération* : en deux dimensions, il s'agira de définir le point d'intersection des cercles dont les centres sont les positions des satellites et les rayons sont les distances entre le module et les satellites (comme illustré en figure 2.1). En trois dimensions, les cercles sont remplacés par des sphères dont le point d'intersection correspond à la position du module.

2.2 Les technologies de mesure

Plusieurs technologies permettent à un capteur de mesurer la distance qui le sépare d'un capteur voisin (ToA, TDoA, RSSI) ou bien de mesurer l'angle qu'il forme avec celui-ci (AoA).

2.2.1 Temps d'arrivée

La technologie ToA (Time of Arrival) suppose que les nœuds du réseau sont synchrones. La distance qui sépare deux capteurs se déduit de la vitesse de propagation du signal et de la différence entre les dates d'émission et de réception du message. Cette technologie est celle utilisée par le système GPS (Global Positioning System) (Parkinson et al, 1996).

Lorsque les nœuds ne sont pas synchrones, l'envoi d'un message aller-retour est nécessaire. En fonction de son horloge, de la vitesse de propagation du signal et du temps de traitement du signal reçu, un capteur récepteur obtient la distance qui le sépare du capteur émetteur en calculant la différence entre les dates d'émission et de réception, en y soustrayant le temps de traitement du signal, puis en divisant le résultat par deux. Cela suppose que les nœuds du réseau ont un temps de traitement du signal identique.

2.2.2 Différence des temps d'arrivée

La technologie TDoA (Time Difference of Arrival) (Savvides et al., 2001) se base sur la différence des dates d'arrivée d'un ou plusieurs signaux et suppose également que la vitesse de propagation des signaux est connue. Cette technologie s'applique dans les cas suivants :

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

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

2.2.3 Puissance du signal

La puissance d'émission et de réception d'un signal peut être également exploitée pour obtenir la distance entre deux capteurs. La technologie RSSI (Received Signal Strength Indicator) (Bahl et Padmanabhan, 2000) considère la perte de puissance d'un signal entre son émission et sa réception. Cette perte varie en fonction de la distance entre les deux capteurs : plus les capteurs sont éloignés (resp. proches), plus la perte est importante (resp. faible). Cette perte sera alors traduite en une distance.

2.2.4 Angle d'arrivée

La technologie AoA (Angle of Arrival) (Niculescu et Nath, 2003a) calcule l'angle formé entre deux capteurs. Chaque capteur est doté d'antennes orientées de sorte à déduire l'angle qu'il forme avec un voisin lorsque ce dernier lui envoie un signal. Cet angle est reporté par rapport à un axe propre au capteur. Toutefois, un capteur peut être équipé d'une boussole et, dans ce cas, l'angle sera reporté sur un des axes nord, sud, est ou ouest.

2.2.5 Conclusions

La précision des mesures réalisées par ces technologies varie selon plusieurs paramètres liés à l'environnement du réseau : obstacles, degré d'humidité, vitesse du vent, ... Par exemple, les technologies RSSI ou AoA sont fortement déconseillées dans des milieux fermés. Des études telles que (Venkatraman et al., 2002; Venkatraman et J. Caffery, 2003) ont analysé l'impact de ces paramètres sur les mesures de distances et d'angles. Enfin, les auteurs de (K. et P., 2002) ont montré que les mesures de distances étaient moins perturbées que celles des angles.

Si certaines méthodes de localisation s'interdisent d'utiliser ces technologies à cause de leurs erreurs de mesure, il est indispensable, pour celles qui les utilisent, de considérer ces erreurs lors du calcul des positions des capteurs.

2.3 La localisation dans les réseaux statiques

Le but de la localisation est d'attribuer une position exacte ou estimée à chacun des capteurs. De par les spécificités des réseaux de capteurs, chaque méthode doit assurer un critère essentiel : le passage à l'échelle. Les hypothèses faites par les méthodes

de localisation sont nombreuses et variées. Souvent, il est supposé que certains capteurs connaissent leurs localisations géographiques. Ces capteurs sont alors appelés des *ancres*. Les modules de localisation (par exemple, le GPS ou Galileo) étant onéreux et consommateurs en énergie, ces méthodes chercheront à utiliser le moins d'ancres possibles.

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

D'autres solutions de natures différentes comme par exemple (Bahl et Padmanabhan, 2000; Priyantha et al., 2000; Want et al., 1992) nécessitent une infrastructure pré-installée tandis que les méthodes (Bulusu et al., 2001; Priyantha et al., 2005) font intervenir des robots pour aider à la localisation.

Ces méthodes sortent du cadre d'étude de cette thèse et c'est pourquoi elles ne seront pas considérées par la suite.

Parmi les méthodes de localisation s'appuyant sur des ancres, deux catégories se distinguent : les méthodes dites *libres de mesure* et celles *basées mesures*. La première concerne l'ensemble des méthodes qui n'utilisent pas les techniques de mesure (ToA, AoA, ...) décrites précédemment. A contrario, la seconde regroupe celles qui les utilisent. Ces familles, décrites ci-après, ont pour références les méthodes HTRefine (méthode libre de mesure), APS, SumDistMinMax (deux méthodes basées mesures de distances) et APS_{AoA} (méthode basée mesures d'angles). Ces quatre méthodes partagent le même schéma d'exécution : chaque ancre diffuse sa position, les capteurs calculent alors une estimation des distances avec les ancres et enfin déduisent leurs positions.

2.3.1 Les méthodes libres de mesure

Dans cette famille de méthodes, les capteurs cherchant à déterminer leurs positions s'appuient uniquement sur les positions des ancres. Aucune mesure de distance ou d'angle n'est utilisée. Par conséquent, ces méthodes ne peuvent fournir que des positions estimées aux capteurs. Les méthodes (He et al., 2005; Bulusu et al., 2000; Nagpal et al., 2003; Chan et al., 2005; Datta et al., 2006; Liu et al., 2007, 2005c), pour ne citer qu'elles, sont des exemples de méthodes libres de mesure.

Il existe deux techniques courantes dans ce type de méthodes. La première consiste à définir des zones contenant les capteurs dont les centres de gravité correspondent à leurs positions estimées. Par exemple, dans (He et al., 2005) les auteurs proposent le

raisonnement suivant : soit n étant le nombre d’ancres dans le réseau, chaque ancre diffuse sa position. Lorsqu’un capteur obtient les positions des n ancres, il calcule tous les triangles possibles qu’il peut former avec ces positions et obtient alors un ensemble de $\binom{n}{3}$ triangles. Ensuite, pour chaque triangle, le capteur détermine s’il se situe à l’intérieur ou à l’extérieur. Après avoir déterminé son appartenance ou non à chacun des triangles, il en déduit une zone le contenant et calcule sa position estimée comme étant le centre de gravité de cette zone. En présence d’un pourcentage faible d’ancres dans le réseau, cette solution est intéressante. En revanche, si l’augmentation de ce pourcentage améliore la précision des positions, elle engendre dans le même temps des calculs importants pour les capteurs.

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

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

HTRefine

Au commencement de la méthode HTRefine, toutes les ancres diffusent leurs positions. Lorsqu’un capteur reçoit la position d’une ancre, il estime la distance qui le sépare d’elle. Pour ce faire, HTRefine utilise la technique d’estimation des distances DV-Hop.

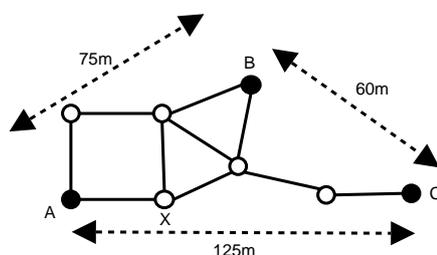


FIG. 2.2: DV-Hop

Dans cette technique, lors de l’inondation des positions des ancres, chaque capteur calcule le nombre de sauts minimum qui le sépare de chacune des ancres. Une deuxième vague d’inondation fournit suffisamment d’informations au capteur pour qu’il puisse convertir ces nombres de sauts en estimations de distances. La conversion consiste à multiplier le nombre de sauts séparant le capteur d’une ancre par une distance moyenne entre deux capteurs voisins. Lors de la première vague, lorsqu’une ancre A reçoit la position d’une ancre B, elle calcule la distance euclidienne qui les sépare et la divise par le nombre de sauts. Elle obtient ainsi une moyenne des distances des sauts entre elle et B et la communique aux capteurs. Lorsque A reçoit d’autres positions d’ancres, elle calibre à nouveau sa distance moyenne et diffuse cette mise à jour

aux capteurs afin qu'ils puissent affiner leurs estimations de distances.

La figure 2.2 est une illustration de DV-Hop où l'ancre A estime la distance moyenne d'un saut. Les nœuds noirs représentent les ancres et les nœuds blancs les capteurs non localisés. Trois sauts séparent A et B alors que quatre séparent A de C . L'ancre A calcule les distances euclidiennes $d_{AB} = 75m$ et $d_{AC} = 125m$. La distance moyenne d'un saut est donnée par la fraction $\frac{125 + 75}{3 + 4} = 28.57m$. Le capteur X estimera les distances avec B et C comme suit : $d_{XB} = 2 \times 28.57$ et $d_{XC} = 3 \times 28.57$.

Pour obtenir leurs positions, les capteurs utilisent ensuite la multilatération (expliquée précédemment pour le système de localisation par satellite). En reprenant l'exemple de la figure 2.2, X obtiendra sa position en résolvant le système suivant :

$$\begin{cases} d_{AX}^2 = (x_X - x_A)^2 + (y_X - y_A)^2 \\ d_{BX}^2 = (x_X - x_B)^2 + (y_X - y_B)^2 \\ d_{CX}^2 = (x_X - x_C)^2 + (y_X - y_C)^2 \end{cases}$$

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

2.3.2 Les méthodes basées mesures

Les méthodes basées mesures utilisent les technologies ToA, RSSI, AoA et autres afin de mesurer les distances ou les angles entre deux capteurs voisins. Grâce à cette capacité de mesure, un capteur pourra, sous certaines conditions, obtenir sa position exacte. Autrement, une position estimée lui sera attribuée. Les méthodes basées mesures sont les plus répandues. Par exemple, les méthodes décrites dans (Barbeau et al., 2004; Savvides et al., 2001; Ji et Zha, 2004; Venkatraman et al., 2002; Moore et al., 2004) utilisent les mesures de distances entre deux capteurs voisins et les méthodes proposées dans (Niculescu et Nath, 2003a; Venkatraman et J. Caffery, 2003; P. et M.L., 2006) s'appuient sur les mesures d'angles.

Les méthodes SumDistMinMax (Savvides et al., 2002), APS (Niculescu et Nath, 2001) et APS_{AoA} (Niculescu et Nath, 2003a) présentées ci-après considèrent pour les deux premières des capteurs ayant la capacité de mesurer des distances et la troisième celle de mesurer des angles.

SumDistMinMax

Dans la méthode SumDistMinMax, chaque ancre commence par diffuser sa position. Lorsqu'un capteur reçoit cette position, il estime la distance qui le sépare de cette

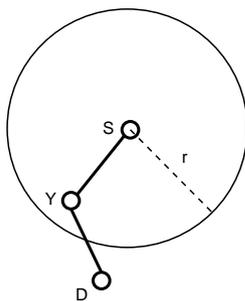


FIG. 2.3: SumDist

ancres en appliquant la technique SumDist qui est la plus simple pour l'estimation de la distance entre un capteur et une ancre. Elle consiste à ajouter les distances mesurées entre chaque paire de capteurs voisins séparant l'ancree et le capteur qui cherche à estimer sa position. Lorsqu'une ancre envoie sa position, elle joint au message la distance qui la sépare d'elle même, c'est à dire 0. A la réception de ce message, chaque capteur voisin mesure la distance avec l'émetteur, l'enregistre, ajoute cette distance à celle contenue dans le message et fait suivre la position de l'ancree avec la distance mise à jour. Le même processus est répété pour tous les capteurs.

Au final, chaque capteur obtient la position de chacune des ancres et calcule une estimation de la distance qui le sépare de celle-ci. La figure 2.3 illustre le fonctionnement de SumDist. Sur cette figure, la distance estimée entre les nœuds S et D est égale à $d_{SY} + d_{YD}$ sachant que de par l'inégalité triangulaire $d_{SD} \leq d_{SY} + d_{YD}$.

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

$$\hat{d}_{x_1a} = d_{x_1x_2} + \hat{d}_{x_2a} \quad (2.1)$$

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

Sur la figure 2.4, le capteur X associe une « boîte » à chacune des ancres A, B, C . Chaque « boîte » est centrée en la position de l'ancree $((x_A, y_A))$ et dépend de la distance estimée (\hat{d}_{XA}) avec le capteur X . Par exemple, la « boîte » centrée en A est construite comme suit :

$$[x_A - \hat{d}_{XA}, y_A - \hat{d}_{XA}] \times [x_A + \hat{d}_{XA}, y_A + \hat{d}_{XA}] \quad (2.2)$$

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

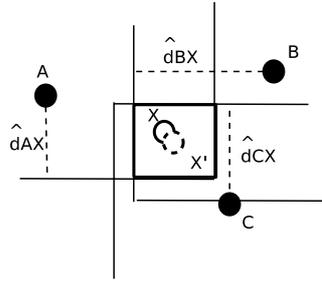


FIG. 2.4: *MinMax*

$$[\max(x_i - \hat{d}_{X_i}), \max(y_i - \hat{d}_{X_i})] \times [\min(x_i + \hat{d}_{X_i}), \min(y_i + \hat{d}_{X_i})] , \quad i \in \{A, B, C\} \quad (2.3)$$

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

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

APS

Dans APS et comme précédemment, les ancres commencent par diffuser leurs positions et les capteurs estiment les distances qui les séparent de ces ancres. La technique d'estimation des distances utilisée dans APS est nommée Euclidean.

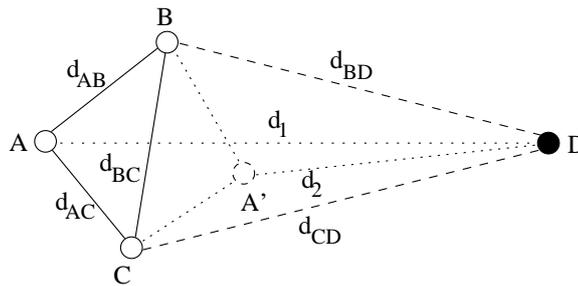


FIG. 2.5: *Euclidean*

Cette technique calcule, sous certaines conditions, une distance exacte lorsqu'un capteur connaît deux voisins ayant estimé leurs distances avec une ancre. Le principe de cette méthode est illustré en figure 2.5. Soient A, B, C étant des capteurs et D une ancre. A cherche à calculer sa distance avec D . B et C sont voisins de A et voisins entre eux. A et B ont calculé leurs distances avec D (d_{BD}, d_{CD}). A connaît alors les distances

$(d_{AB}, d_{AC}, d_{BC}, d_{BD}, d_{CD})$. Par conséquent, il connaît tous les côtés et une diagonale du quadrilatère $ABCD$. La seconde diagonale correspond à la distance d_{AD} . Mais deux distances sont possibles (d_1 et d_2). Un processus de *vote des voisins* et un autre dit du *voisin commun* permet à A de déduire la distance qui le sépare de D . En fait, ces processus font intervenir un troisième capteur ayant lui aussi estimé sa distance avec D . Selon le cas où ce capteur est voisin de B ou C , ou bien voisin des deux, ces processus, par de simples relations géométriques, déduisent la distance d_{AD} .

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

APS_{AoA}

APS_{AoA} est une extension de la méthode précédente qui considère des capteurs ayant, non pas la capacité de mesurer les distances avec leurs voisins, mais celle de mesurer les angles.

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

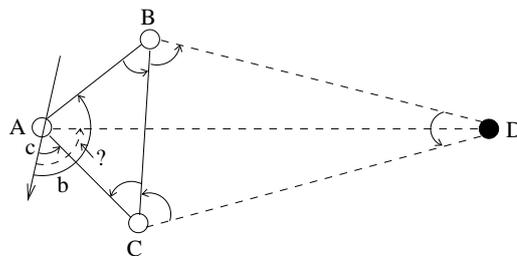


FIG. 2.6: APS avec AoA

La figure 2.6 présente comment un capteur déduit l'angle avec une ancre distante. Le capteur A cherche à déduire son angle avec l'ancre D par rapport à son axe de référence. Les capteurs B et C , voisins de A et voisins entre eux, connaissent les angles respectifs qu'ils forment avec D . Ainsi les angles des triangles ABC et BCD sont connus et l'angle \widehat{DAC} peut être calculé. L'angle par rapport à l'axe de A sera donc égal à $c + \widehat{DAC}$.

Dès lors qu'un capteur a obtenu les angles qu'il forme avec au moins trois ancres, il obtient sa position grâce à la triangulation qui, en considérant la figure 2.7a, donne le système suivant :

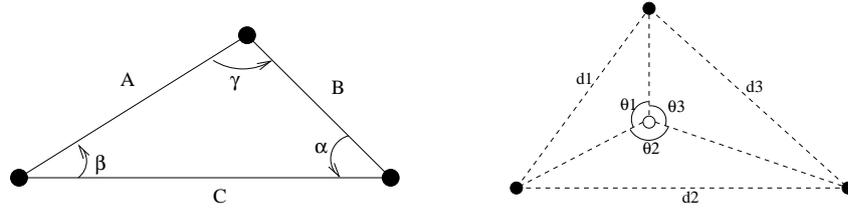


FIG. 2.7: a) La triangulation

b) Calcul de la position

$$\begin{cases} A^2 = B^2 + C^2 - 2BC\cos\alpha \\ B^2 = A^2 + C^2 - 2AC\cos\beta \\ C^2 = A^2 + B^2 - 2AB\cos\gamma \end{cases}$$

Ainsi, la triangulation sera utilisée lorsqu'un capteur cherchant sa position possède au moins trois ancres dans son voisinage comme illustré en figure 2.7b. En connaissant les distances d_1, d_2, d_3 entre les ancres et les angles $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, le capteur calcule sa position.

Remarque : D'autres méthodes basées mesures (par exemple (P. et M.L., 2006, 2005; Boushaba et al., 2007; M. Boushaba et Benslimane, 2007)) s'appuient sur une modélisation des pertes en précision lors du calcul des angles ou des distances. Ce modèle est ensuite utilisé pour déterminer les positions des capteurs. Or, cette perte en précision est liée à l'environnement de la zone de déploiement du réseau et aucune modélisation est capable de représenter n'importe quel environnement. Par conséquent, les méthodes proposées dans cette thèse ne s'appuient sur aucun modèle de pertes en précision concernant les mesures de distances ou d'angles.

Ce paragraphe nous amène à constater que le problème de la localisation dans les réseaux statiques a été largement abordé sous des hypothèses différentes. Mais qu'en est-il du problème de la localisation dans les réseaux mobiles ?

2.4 La localisation dans les réseaux mobiles

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

capteurs libres dans leurs déplacements ; c'est à dire qu'aucun des déplacements, et notamment ceux des ancrés, n'est prédictible. Trois configurations sont alors possibles :

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

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

Le chapitre suivant propose une famille de trois méthodes de localisation dans les réseaux statiques : la première est libre de mesure, la seconde est basée sur les mesures de distances et la dernière sur les mesures d'angles. Ces méthodes ont la particularité de convertir des capteurs non localisés au départ en ancrés afin de contribuer à la localisation des autres capteurs. Elles proposent également une gestion des erreurs de position ou de mesures et attribuent ainsi des positions précises à tous les capteurs. Les performances de ces méthodes sont comparées à celles des méthodes libres et basées mesures décrites ci-avant.

Le chapitre 4 décrit une extension au contexte de mobilité de la famille de méthodes de localisation dans les réseaux statiques et traite chacune des configurations de mobilité citées précédemment. Il présente également une adaptation des stratégies d'ordonnement des dates auxquelles un capteur doit invoquer le calcul de sa position introduites par (Tilak et al., 2005) afin de prendre en compte les erreurs de position des capteurs.

Chapitre 3

AT-Family : une famille de méthodes de localisation dans les réseaux statiques

Ce chapitre présente une famille de trois techniques d'approximation de localisation dans les réseaux statiques nommée AT-Family (Family of Approximation Techniques) s'appuyant sur les capacités des capteurs. Les trois méthodes AT-Free, AT-Dist et AT-Angle considèrent respectivement les cas où les capteurs n'ont aucune capacité de mesure ou bien ont la capacité de mesurer soit les distances, soit les angles avec leurs voisins. AT-Free fait partie de l'ensemble des méthodes dites *libres de mesure*, à l'inverse des méthodes AT-Dist et AT-Angle qui appartiennent à l'ensemble des méthodes *basées mesures*. Toutes attribuent aux capteurs des positions estimées à l'aide de techniques d'approximation et parfois même des positions exactes (aux erreurs de mesure prêt) pour les méthodes AT-Dist et AT-Angle qui utilisent des règles de localisation. Leur principe général reste le même mais leur fonctionnement diffère en fonction des capacités de mesure des capteurs. Ces méthodes assurent deux propriétés : la première donne à chaque capteur une indication sur la précision de sa position (en lui fournissant sa borne d'erreur de position) et la seconde permet d'éliminer de fausses informations de localisation. Ces propriétés ont un fort impact sur la précision des positions attribuées.

3.1 Pré-requis

Le problème de la localisation diffère selon les hypothèses faites concernant la mobilité et la capacité des capteurs. Afin d'organiser ces différentes configurations, la notation suivante est proposée :

$$\langle x, y, z \rangle,$$

avec $x, y \in \{S, M\}$ et $z \in \{\emptyset, dist, angle\}$.

Le premier (resp. le second) champ indique si les capteurs non localisés (resp. les ancres) sont statiques (noté S) ou mobiles (noté M). Il existe donc quatre configurations possibles : les capteurs et les ancres sont statiques, mobiles, ou bien les premiers statiques et les seconds mobiles et inversement. Le dernier champ indique la capacité de mesure des nœuds : ils peuvent n'avoir aucune capacité (ce qui est noté \emptyset) ou bien peuvent mesurer soit les distances (noté $dist$), soit les angles (noté $angle$) avec leurs voisins.

Ce chapitre s'intéresse au problème de la localisation dans les configurations $\langle S, S, z \rangle$ avec $z \in \{\emptyset, dist, angle\}$. Le chapitre suivant traitera du problème de la localisation dans les réseaux mobiles.

On considère des capteurs ayant les mêmes capacités : même énergie, même puissance de calcul, ... Leur rayon d'émission noté r est identique. Un réseau de capteurs est représenté par un graphe non orienté $G(V, E)$ où V est l'ensemble des n nœuds représentant les capteurs et E est l'ensemble des m arêtes représentant les liens de communication. Si deux nœuds $u, v \in V$ sont voisins alors il existe un lien de communication entre eux. En d'autres termes, la distance entre u et v est inférieure au rayon d'émission r . Un tel graphe est un Unit Disc Graph.

$$E = \{(u, v) \in V^2 \mid u \neq v \text{ et } d_{uv} \leq r\}$$

Les cercles d'émission sont donc considérés comme étant « parfaits ». Cette hypothèse sera discutée par la suite.

L'ensemble des voisins d'un nœud u est noté $N(u)$. A priori, certains capteurs connaissent leurs positions exactes (par exemple via le GPS ou autre). Ces nœuds sont dénommés *ancres* et l'ensemble de ces ancres est noté Δ . Dans les figures représentant des réseaux, les capteurs non localisés sont représentés par des nœuds blancs et les ancres par des nœuds noirs. L'ensemble des ancres voisines d'un nœud u est noté $N_{\Delta}(u)$ ($N_{\Delta}(u) = N(u) \cap \Delta$) et l'ensemble des ancres non voisines de u est noté $\overline{N_{\Delta}}(u)$ ($\overline{N_{\Delta}}(u) = \Delta \setminus N_{\Delta}(u)$). La position d'un nœud u est notée (x_u, y_u) . \mathcal{P} est l'ensemble des positions du plan représentant un réseau. Chacune des méthodes d'AT-Family définit une zone pour chacun des nœuds. La zone d'un nœud u , notée Z_u , contient toutes les positions possibles pour u .

Dans la méthode AT-Dist, les capteurs ont la capacité de mesurer les distances avec leurs voisins en utilisant une des technologies ToA/TdoA, RSSI. La distance entre deux nœuds voisins u et v est notée d_{uv} . Donc lorsqu'un capteur reçoit un signal d'un capteur voisin, il en déduit qu'il se situe sur le cercle centré en ce voisin et de rayon la distance les séparant. Lorsque les capteurs u et v ne sont pas voisins, la distance séparant ces deux nœuds est estimée et sera notée \hat{d}_{uv} .

AT-Angle suppose que les capteurs peuvent mesurer les angles qu'ils forment avec leurs voisins. Lorsqu'un capteur reçoit un signal en provenance d'un de ses voisins, il en déduit un angle qu'il rapporte à un des axes (nord, sud, est, ouest). Tous les angles sont calculés à partir du même axe de référence. L'angle reporté sur l'axe de référence du nœud u lorsqu'il reçoit un signal du nœud v est noté $\angle u, v$.

Le champ d'étude du problème de la localisation est restreint à deux dimensions. L'extension à la troisième dimension sera discutée plus loin dans ce chapitre.

3.2 AT-Free : une méthode libre de mesure

Dans AT-Free, les capteurs connaissent uniquement les positions des ancrs (il s'agit de la configuration $\langle S, S, \emptyset \rangle$). En fonction de ces positions, chaque capteur définit une zone géographique le contenant et prend pour position le centre de gravité de celle-ci. Chaque nœud peut savoir si sa position estimée est proche de sa position réelle et, le cas échéant, devient une *ancree estimée* afin d'aider à son tour les autres nœuds à se localiser. Cette section montre également comment AT-Free peut être utilisée en étape préliminaire par d'autres techniques de localisation afin d'améliorer la précision de leurs résultats.

3.2.1 Technique d'approximation

Au départ, chaque ancre diffuse sa position. Un nœud peut donc en déduire le nombre de sauts qui le sépare de chacune des ancrs (seul le plus petit nombre de sauts est retenu). A la réception de la position d'une ancre, un nœud considère les cas suivants :

- s'il reçoit la position directement de l'ancree, il en déduit qu'ils sont voisins et donc qu'il appartient au disque centré en l'ancree de rayon r .
- s'il reçoit la position par un nœud intermédiaire, il en déduit qu'il n'est pas voisin de l'ancree et donc qu'il n'appartient pas au disque de rayon r centré en l'ancree. En revanche, il appartient au disque centré en l'ancree de rayon $r \times h$, où h représente le nombre de sauts entre le nœud et l'ancree.

La conjonction de toutes ces informations pour chacune des ancrs définit une zone contenant le nœud dont la position estimée est calculée comme étant le centre de gravité de cette zone.

En résumé, pour chaque nœud $u \in V \setminus \Delta$, la zone Z_u de u est obtenue de la façon suivante :

$$Z_{N_\Delta(u)} = \bigcap_{a \in N_\Delta(u)} \{(x_i, y_i) \in \mathcal{P} \mid (x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 \leq r^2\} \quad (3.1)$$

$$Z_{\overline{N_\Delta(u)}} = \bigcap_{a \in \overline{N_\Delta(u)}} \{(x_i, y_i) \in \mathcal{P} \mid r^2 < (x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 \leq (r \times h_a)^2\} \quad (3.2)$$

$$Z_u = Z_{N_\Delta(u)} \cap Z_{\overline{N_\Delta(u)}} \quad (3.3)$$

Cette technique est illustrée dans la figure 3.1. Soit X étant le nœud cherchant à estimer sa position et A, B, C étant des ancrs. Lorsque X reçoit les positions des ancrs

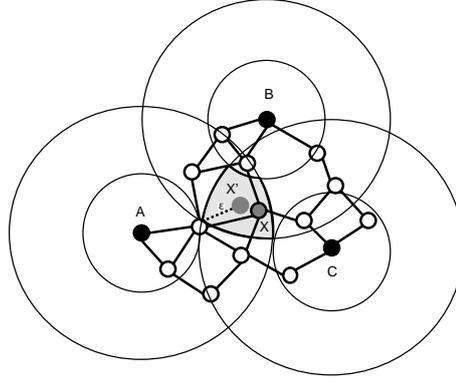


FIG. 3.1: Approximation de la position du capteur X dans AT-Free

A , B et C , il calcule le nombre de sauts entre lui et ces ancres. Il n'est pas voisin de ces ancres et donc en déduit qu'il est à l'extérieur des disques de rayon r centrés en A , B et C et qu'il appartient aux disques de rayon $r \times h_i$ centrés en A , B et C avec h_i le nombre de sauts séparant respectivement X de A, B, C ($i \in \{A, B, C\}$). La conjonction de ces données définit la zone grisée sur la figure et le centre de gravité X' de cette zone représente la position estimée de X .

Lorsqu'un capteur estime sa position en fonction de sa zone, il est capable de calculer une borne de son erreur de position et savoir ainsi si sa position estimée est proche de sa position réelle. En effet, soit ϵ la distance entre la position estimée du capteur (le centre de gravité) et le point le plus éloigné du centre de gravité contenu dans la zone. En considérant la distance d_{err} entre les positions réelle et estimée du nœud (qui représente l'erreur de position du capteur), il est clair que $d_{err} \leq \epsilon$. Par conséquent, ϵ représente la borne de l'erreur de position du nœud. En définissant un seuil *threshold*, la position du capteur sera considérée comme étant précise si $\epsilon \leq \text{threshold}$. Dans ce cas, le capteur devient une ancre estimée et diffuse sa position avec son ϵ .

Lorsque la technique d'approximation décrite précédemment est exécutée avec une ancre estimée, la borne d'erreur ϵ est prise en compte. Concrètement, lorsqu'un capteur reçoit la position d'une ancre estimée et son ϵ , il en déduit s'ils sont voisins qu'il appartient au disque centré en l'ancre de rayon $r + \epsilon$. Autrement, il conclut qu'il n'appartient pas au disque centré en l'ancre de rayon $r - \epsilon$ et appartient à celui de rayon $(r \times h) + \epsilon$.

Les ensembles $Z_{N_{\Delta}(u)}$ et $Z_{\overline{N_{\Delta}(u)}}$ définis en 3.1 et 3.2 deviennent alors :

$$Z_{N_{\Delta}(u)} = \bigcap_{a \in N_{\Delta}(u)} \{(x_i, y_i) \in \mathcal{P} \mid (x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 \leq (r + \epsilon_a)^2\} \quad (3.4)$$

$$Z_{\overline{N_{\Delta}(u)}} = \bigcap_{a \in \overline{N_{\Delta}(u)}} \{(x_i, y_i) \in \mathcal{P} \mid (r - \epsilon_a)^2 < (x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 \leq (r \times h_a + \epsilon_a)^2\} \quad (3.5)$$

avec $\epsilon_a = 0$ pour les ancres localisées exactement.

3.2.2 Gestion des diffusions

Pour augmenter la précision des positions attribuées par AT-Free, il faut fournir un maximum d'informations de localisation. L'idéal serait qu'un capteur diffuse sa première position estimée (avec sa borne d'erreur) et dès qu'une nouvelle position est calculée, il la rediffuse avec son nouvel ϵ et ainsi de suite ... Au final, chaque nœud obtiendrait la meilleure position possible avec AT-Free. De par la contrainte énergétique, cette solution n'est pas réaliste. Il est donc nécessaire de mettre en place une stratégie de diffusion afin de trouver le meilleur compromis entre le nombre autorisé de diffusions pour un capteur et la précision des positions.

Dans la section précédente, un nœud devient une ancre dès lors que son ϵ est inférieur à un certain seuil. Seules les ancres (estimées ou non) sont autorisées à diffuser leurs positions. Soit Γ et ρ deux seuils tels que $\Gamma > \rho > 0$ (le choix des valeurs de ses seuils est discuté dans la partie consacrée aux simulations). Lorsque la borne d'erreur ϵ d'un capteur est inférieure au seuil Γ , le nœud devient une ancre estimée et commence à diffuser sa position et son ϵ . Dès que sa borne d'erreur passe en dessous du seuil ρ , on considère que l'ancre est localisée avec une très bonne précision et elle ne cherchera plus à améliorer sa position, arrêtant ainsi ses diffusions. Toutefois, entre le moment où une ancre commence à diffuser ($\epsilon \leq \Gamma$) et celui où elle arrête ($\epsilon \leq \rho$), il n'est pas raisonnable de l'autoriser à diffuser sa position à chaque amélioration. La fréquence de diffusion sera dictée par le principe suivant : « *Plus la position d'une ancre est précise, plus la fréquence de diffusion de l'ancre augmente* ». En d'autres termes, la fréquence de diffusion entre les seuils Γ et ρ doit s'accroître au fur et à mesure que la borne d'erreur ϵ se rapproche de ρ . Ce principe de diffusion a été validé par simulation. Pour définir les différents seuils entre Γ et ρ respectant le principe énoncé, la constante multiplicative λ est définie telle que $0 < \lambda < 1$ et les différents seuils sont calculés de la manière suivante :

$$\Gamma \geq \lambda\Gamma \geq \lambda^2\Gamma \geq \dots \geq \lambda^i\Gamma \geq \dots \geq \rho, \quad i \in \mathbb{N} \quad (3.6)$$

Par conséquent, lorsque la valeur de λ est petite (resp. grande), le nombre de diffusions diminue (resp. augmente). Ainsi, la fréquence de diffusion accélère en fonction de la précision de la position du capteur. Les expéditions d'une ancre s'arrêtent dès lors qu'une constante k , telle que $k > i > 0$, vérifie la condition suivante :

$$\lambda^k\Gamma \leq \rho \quad (3.7)$$

Cette constante k représente le nombre autorisé de diffusions (ou d'itérations) pour une ancre. La borne maximale de k est obtenue comme suit :

$$k \leq \frac{\log\rho - \log\Gamma}{\log\lambda} \quad (3.8)$$

et λ sera calculée comme ci-dessous :

$$\lambda \simeq \left(\frac{\rho}{\Gamma}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.9)$$

Il est à noter que la constante k ne représente qu'une borne maximale du nombre de diffusions. Une ancre diffuse sa position dès que sa borne d'erreur ϵ est inférieure à un des seuils $\Gamma, \lambda\Gamma, \lambda^2\Gamma, \dots, \rho$. Pour qu'elle exécute exactement k diffusions, il faudrait que chacune de ses améliorations fasse successivement passer sa borne d'erreur en dessous de chacun des seuils. Or, il est possible que les données de localisation reçues lui permettent de se localiser avec une borne d'erreur fortement améliorée, la faisant passer en dessous non pas d'un mais de plusieurs des seuils suivants. Dans ce cas, l'ancre exécutera moins de k diffusions.

En considérant cette stratégie de diffusion, on peut constater que la précision des positions attribuées par AT-Free dépend des choix de Γ, ρ, k et λ . Par conséquent, il est intéressant de souligner qu'AT-Free est totalement paramétrable. La section 3.9 montre l'impact du choix des valeurs de ces constantes sur les performances d'AT-Free.

3.2.3 AT-Free en étape préliminaire

Grâce aux zones définies dans cette méthode et grâce au fait qu'elle soit paramétrable, il est possible de l'exécuter en étape préliminaire par une autre technique de localisation. AT-Free est une méthode libre de mesure et se base uniquement sur des données exactes. Les zones attribuées aux capteurs sont donc précises. Après avoir exécuté AT-Free en étape préliminaire, chaque nœud obtient une zone avec la certitude de lui appartenir. Ensuite, les positions attribuées seront soit adoptées, soit rejetées par la technique de localisation.

Après exécution d'AT-Free, un capteur a la possibilité de conserver sa zone en mémoire ou bien seulement deux informations : sa position estimée (notée P_{ATF}) et sa borne d'erreur ϵ . Ainsi, chaque capteur sait que sa position exacte se situe dans le disque de centre P_{ATF} et de rayon ϵ . Pour des raisons d'économie de mémoire et de rapidité de calcul, c'est cette deuxième solution qui sera utilisée. Ensuite, durant l'exécution de la technique de localisation, lorsqu'un nœud se voit attribuer une position P , il vérifie si cette position est cohérente avec sa zone en testant si la distance entre P et P_{ATF} est inférieure ou égale à ϵ . Dans ce cas le nœud adopte la position P , sinon il conserve la position P_{ATF} .

Exécuter une méthode de localisation en étape préliminaire peut être très coûteux en énergie. La section précédente a montré qu'AT-Free est paramétrable. Le paramètre k , qui correspond au nombre maximum autorisé de diffusions pour une ancre, est très intéressant en terme d'économie d'énergie mais il a un impact direct sur la précision des positions des capteurs. En effet, plus on augmente le nombre maximum de diffusions pour les ancres, plus les valeurs des ϵ seront faibles et, par conséquent, plus les capteurs pourront rejeter de fausses informations de localisation. Il s'agit donc de trouver une

valeur de k assurant le meilleur compromis entre la dépense d'énergie et la précision des zones contenant les capteurs. Les simulations en section 3.9 montrent l'efficacité d'AT-Free en étape préliminaire malgré l'attribution volontaire d'une petite valeur à k .

3.3 AT-Dist : une méthode basée mesures de distance

La connaissance des distances entre nœuds voisins fournit des informations considérables pour la localisation. La méthode proposée dans cette section suppose que les capteurs ont la capacité de mesurer les distances avec leurs voisins ($\langle S, S, dist \rangle$). Grâce à cette capacité, AT-Dist améliore la technique d'approximation des positions d'AT-Free et définit des règles permettant de localiser exactement certains nœuds.

3.3.1 Technique d'approximation

Le principe général reste le même que celui d'AT-Free. Le changement concerne l'estimation de la distance séparant un nœud et une ancre distante. Précédemment, cette distance était estimée comme étant le produit du rayon d'émission r et du nombre de sauts entre le nœud et l'ancre. AT-Dist utilise la technique d'estimation des distances SumDist (Savvides et al., 2002) faisant la somme des distances entre les nœuds séparant un capteur d'une ancre. Les distances ainsi estimées sont notées \hat{d} .

Soit X étant un capteur recevant la position d'une ancre A . S'ils sont voisins ($A \in N_\Delta(X)$), X en déduit la distance exacte notée d_{AX} . Par conséquent, X appartient au cercle centré en A de rayon d_{AX} . Par contre, si X et A ne sont pas voisins ($A \notin N_\Delta(X)$) alors X en déduit qu'il n'appartient pas au disque centré en A de rayon r mais appartient à celui de centre A et de rayon \hat{d}_{AX} . De par l'inégalité triangulaire, la distance euclidienne entre X et A est inférieure ou égale à \hat{d}_{AX} . X applique cette technique pour chaque position qu'il reçoit et la conjonction de ces données de localisation définit une zone géographique Z_X . Le centre de gravité de cette zone représente la position estimée de X .

Pour résumer, pour chaque nœud $u \in V \setminus \Delta$, la zone Z_u est obtenue de la façon suivante :

$$Z_{N_\Delta(u)} = \bigcap_{a \in N_\Delta(u)} \{(x_i, y_i) \in \mathcal{P} \mid (x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 = d_{ua}^2\} \quad (3.10)$$

$$Z_{\overline{N_\Delta}(u)} = \bigcap_{a \in \overline{N_\Delta}(u)} \{(x_i, y_i) \in \mathcal{P} \mid r^2 < (x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 \leq \hat{d}_{ua}^2\} \quad (3.11)$$

$$Z_u = Z_{N_\Delta(u)} \cap Z_{\overline{N_\Delta}(u)} \quad (3.12)$$

La figure 3.2 présente un exemple d'utilisation de cette technique d'approximation. Soit X un nœud cherchant à estimer sa position et A, B, C, D des ancres dont il n'est pas voisin. A la réception des positions de ces ancres, X estime avec SumDist les distances $\hat{d}_{AX}, \hat{d}_{BX}, \hat{d}_{CX}, \hat{d}_{DX}$ le séparant de chacune des ancres. Il en déduit qu'il est en

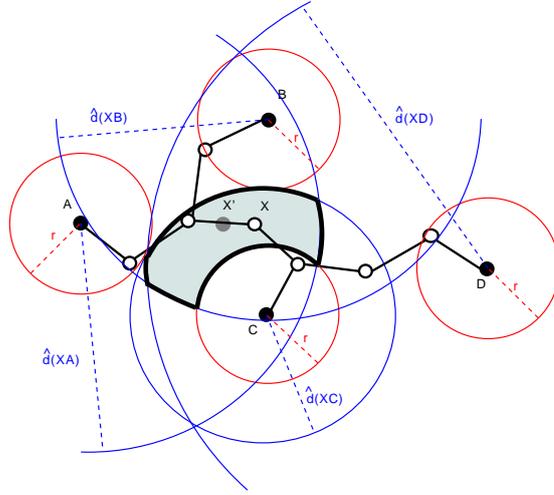


FIG. 3.2: Approximation de la position du capteur X dans AT-Dist

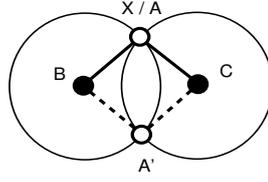
dehors des disques centrés en ces ancres de rayon r et, de par l'inégalité triangulaire, il sait qu'il appartient aux disques de rayons respectifs les distances $\hat{d}_{AX}, \hat{d}_{BX}, \hat{d}_{CX}, \hat{d}_{DX}$. L'intersection de ces disques définit la zone Z_X (représentée en gris sur la figure). La position estimée de X correspond au centre de gravité de cette zone noté X' .

Comme dans AT-Free, le capteur déduit, lors de l'estimation de sa position, sa borne d'erreur de position ϵ . Si cette ϵ est inférieure au seuil Γ défini précédemment, le capteur devient une ancre estimée et diffuse sa position ainsi que son ϵ .

En utilisant la connaissance des distances, des informations de localisation sont ajoutées. Cela permet d'être plus sévère sur la gestion des diffusions d'une ancre en n'en autorisant qu'une seule ($\Gamma = \rho$). La valeur du seuil Γ sera choisie très petite (15% du rayon d'émission dans nos simulations) afin de garantir une bonne estimation des positions. Il est donc intéressant de souligner que la connaissance des distances entre les nœuds voisins apporte un gain considérable en terme d'économie d'énergie (malgré le surplus d'énergie consommé dû à l'utilisation d'un module de mesure) et de rapidité de convergence.

Comme dans AT-Free, la technique d'approximation est adaptée afin de prendre en compte les bornes d'erreurs de position des ancres estimées. Prenons un capteur X calculant sa position avec une ancre estimée A . S'ils sont voisins, X trace deux cercles centrés en A de rayons $d_{AX} \pm \epsilon$ et en déduit qu'il se situe entre ces deux cercles. S'ils ne sont pas voisins, X en déduit qu'il n'appartient pas au disque centré en A de rayon $r - \epsilon$ mais appartient à celui de rayon $\hat{d}_{AX} + \epsilon$. Les définitions 3.10 et 3.11 des ensembles $Z_{N_\Delta(u)}$ et $Z_{\overline{N_\Delta}(u)}$ deviennent :

$$Z_{N_\Delta(u)} = \bigcap_{a \in N_\Delta(u)} \{(x_i, y_i) \in \mathcal{P} \mid (d_{ua} - \epsilon_a)^2 \leq (x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 \leq (d_{ua} + \epsilon_a)^2\} \quad (3.13)$$


 FIG. 3.3: La position réelle de X est en A ou en A'

$$Z_{\overline{N_\Delta}(u)} = \bigcap_{a \in \overline{N_\Delta}(u)} \{(x_i, y_i) \in \mathcal{P} \mid (r - \epsilon_a)^2 < (x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 \leq (\hat{d}_{ua} + \epsilon_a)^2\} \quad (3.14)$$

avec $\epsilon_a = 0$ pour les ancres localisées avec exactitude.

3.3.2 Règles de localisation (MuR - Method using Rules)

Cette section présente trois règles de localisation permettant à AT-Dist de localiser exactement certains capteurs. Ces règles résolvent l'ambiguïté lorsqu'un capteur peut se trouver en plusieurs positions. Ce cas est illustré par la figure 3.3. Le nœud X cherche à calculer sa position et B, C sont des ancres **non estimées** telles que $B, C \in N_\Delta(X)$. X appartient aux cercles centrés respectivement en B et C de rayons d_{BX} et d_{CX} . Les deux points d'intersection de ces cercles notés A et A' représentent deux positions possibles pour X . Par la suite, la position A sera considérée comme étant la position exacte du nœud X .

Les trois règles définies ci-après résolvent dans certains cas l'ambiguïté lorsqu'une telle situation se présente, permettant ainsi à un capteur de se localiser avec exactitude. Ces règles constituent à elles seules une méthode de localisation puisque, selon la configuration et l'environnement du réseau, elles peuvent localiser tous les nœuds. Cette méthode, appelée MuR (Method using Rules), a la particularité de pouvoir être exécutée en étape préliminaire par toutes les techniques de localisation s'appuyant sur les distances afin d'augmenter le nombre d'ancres dans le réseau.

Règle 1

Cette première règle définit un encadrement de la position de X lorsqu'il reçoit la position d'une ancre distante.

La figure 3.4 sera utilisée pour expliquer cette règle. Soit X un nœud cherchant sa position, B, C deux ancres telles que $B, C \in N_\Delta(X)$ et D une ancre telle que $D \notin N_\Delta(X)$. On retrouve le cas d'ambiguïté pour le capteur X qui peut se localiser en A ou en A' .

Dans un premier temps, D est considérée comme étant une ancre localisée avec exactitude. Lorsque X reçoit la position de D , il estime la distance avec cette ancre (\hat{d}_{XD}). X commence par supposer qu'il est situé en A et doit donc vérifier les deux conditions suivantes :

Règle 2

Dans cette règle, l'ancre D n'appartient pas au voisinage du capteur X . A l'inverse de la règle 1, la règle 2 n'utilise pas la technique d'estimation de distance SumDist.

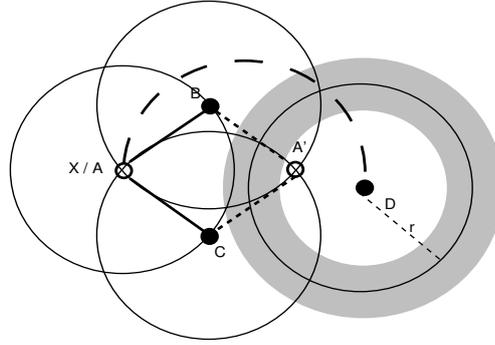


FIG. 3.5: Règle 2

Dans la figure 3.5, on retrouve le cas d'ambiguïté pour le nœud X avec ses ancres voisines B et C . Considérons l'ancre D comme étant localisée avec exactitude. Lorsque X reçoit la position de l'ancre, il vérifie si $d_{A'D} \leq r$ signifiant que les nœuds X (supposé positionné en A') et D seraient voisins ce qui n'est pas le cas. Par conséquent, la position de X ne peut être qu'en A . Dans toute autre configuration, X ne peut pas conclure. La condition de cette règle se résume comme ceci :

$$d_{AD} > r \wedge d_{A'D} \leq r \quad (3.17)$$

X ne peut pas conclure si $d_{AD} > r$ et $d_{A'D} > r$.

Lorsque D est une ancre estimée, son ϵ doit être pris en compte et son cercle réel de rayon r appartient alors à la surface définie par les deux cercles de rayons $r \pm \epsilon$ (représentée en gris sur la figure 3.5). X est assuré d'être en A si A n'appartient pas au disque centré en D de rayon $r + \epsilon$ et si A' appartient au disque centré en D de rayon $r - \epsilon$. La condition devient :

$$d_{AD} > r + \epsilon \wedge d_{A'D} \leq r - \epsilon \quad (3.18)$$

En se rapportant à la figure 3.5, X détermine sa position si A est à l'extérieur de la zone définie par la partie grisée et A' à l'intérieur.

Règle 3

Le principe de cette règle est le même que celui de la règle précédente en considérant cette fois ci l'ancre D comme voisine de X . Cette règle est illustrée par la figure 3.6.

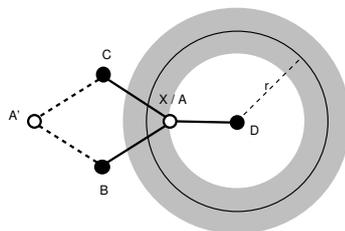


FIG. 3.6: Règle 3

En considérant une ancre D localisée exactement, le nœud X conclut qu'il est positionné en A si A appartient au disque de centre D et de rayon r alors que A' non. X et D étant voisins, X en déduira qu'il est en A . Cette règle se résume comme suit :

$$d_{AD} \leq r \wedge d_{A'D} > r \quad (3.19)$$

Si $d_{AD} \leq r$ et $d_{A'D} \leq r$ alors X ne peut pas conclure.

Lorsque D est une ancre estimée, son ϵ est pris en compte et la condition devient :

$$d_{AD} \leq r - \epsilon \wedge d_{A'D} > r + \epsilon \quad (3.20)$$

X conclut qu'il est en A si A est à l'intérieur du disque de centre D et de rayon $r - \epsilon$ et A' est à l'extérieur du disque centré en D et de rayon $r + \epsilon$.

Discussion sur les règles

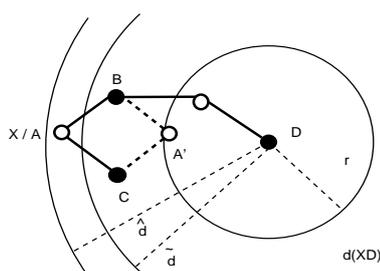


FIG. 3.7: Efficacité de la règle 2

Les règles 2 et 3 sont utiles lorsque des erreurs de mesure sont introduites dans les calculs de distances. Sans erreur de mesure, la règle 2 est incluse dans la règle 1. Prenons la situation décrite dans la figure 3.7. Lorsque X estime sa distance avec D par SumDist, il obtient \hat{d} si les mesures de distance ne sont pas perturbées par des erreurs de mesure, \tilde{d} sinon. Sur la figure 3.7, les erreurs de mesure sont telles que $\tilde{d} < \hat{d}$. Sans erreur de mesure, les règles 1 et 2 résolvent l'ambiguïté. En considérant les erreurs de

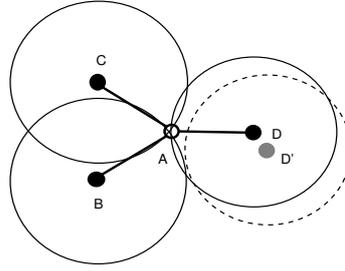


FIG. 3.8: Défaut de la multilatération

mesure, X ne peut conclure avec la règle 1 alors que la règle 2 attribuera une position exacte au nœud X .

L'absence d'erreur de mesure rend également la règle 3 inutile. En effet, dans cette règle un nœud doit contenir au moins trois ancrés dans son voisinage. En connaissant les distances exactes et les positions des ancrés, le nœud calculera sa position en utilisant la trilatération qui définit la position d'un nœud comme étant l'intersection en un seul point d'au moins trois cercles. Toutefois, cette technique est très sensible aux erreurs de mesure. Cette situation est illustrée par la figure 3.8. Sur cette figure, le nœud A contient trois ancrés B, C et D dans son voisinage. Sans erreur de position et de mesure, les trois cercles centrés en ces ancrés de rayons respectifs les distances les séparant de A s'intersectent exactement en la position de A . En considérant une erreur de position de l'ancre D en D' , les trois cercles ne s'intersectent plus en un même point et le nœud A ne peut pas obtenir sa position. La règle 3 est insensible à cette erreur.

Dans certains cas, il se peut également que les erreurs de mesure perturbent les règles. La sous section suivante illustre ce cas et montre comment le gérer.

Processus de vote

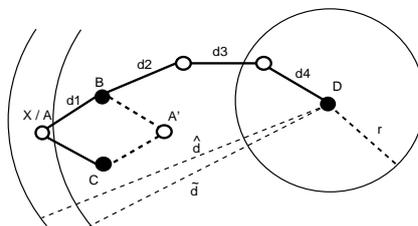


FIG. 3.9: Erreurs de mesure dans SumDist

Lorsqu'un nœud obtient sa position par une des règles, il est certain de son exactitude. Toutefois, la présence d'erreurs relatives aux positions des ancrés (erreurs de position, de mesure, comportements byzantins, ...) peut perturber les règles dans la

résolution des ambiguïtés. Cette situation est représentée par la figure 3.9.

Soient les distances $\hat{d} = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$ et $\tilde{d} = \tilde{d}_1 + \tilde{d}_2 + \tilde{d}_3 + \tilde{d}_4$ estimées par SumDist respectivement obtenues sans et avec des erreurs de mesure telles que $\tilde{d} < \hat{d}$. En considérant l'estimation de la distance de SumDist sans erreur de mesure (\hat{d}), aucune règle ne résout l'ambiguïté. Le nœud X ne peut donc pas déterminer sa position. En présence d'erreurs de mesure, la distance retournée par SumDist (\tilde{d}) est sous-estimée. Dans cette situation, le point A' se trouve entre les deux cercles centrés en D de rayons respectifs r et \tilde{d} alors que A se trouve à l'extérieur. X en conclut qu'il est en A' par la règle 1 ce qui est faux.

Finalement, cet exemple montre qu'un capteur ne doit pas faire confiance à une seule ancre pour calculer sa position dès lors que des erreurs sur les informations de localisation sont introduites. Le processus de vote décrit ci-après requiert que chaque nœud considère plusieurs ancres afin de déterminer laquelle des positions p_1 et p_2 correspond à sa localisation. Le principe du processus de vote est simple. A chaque réception d'une position d'une ancre, le nœud applique chacune des règles et incrémente de 1 le compteur cp_1 (resp. cp_2) lorsqu'il se localise en p_1 (resp. p_2). Le capteur vérifie alors si $cp_1 - cp_2 \geq \text{confidence}$ (resp. $cp_2 - cp_1 \geq \text{confidence}$), où *confidence* représente un seuil de confiance au dessus duquel le capteur considère que sa position est en p_1 (resp. p_2). En d'autres termes, le capteur adopte la position attribuée par une majorité d'ancres avec un écart supérieur au seuil *confidence*. Sans erreur de mesure ou autre, ce seuil sera fixé à 1. En fait, la valeur du seuil *confidence* est déterminée par l'environnement du réseau. Par exemple, dans un réseau fortement perturbé par des erreurs de mesure (dus à des obstacles), des comportements byzantins, ... la valeur de ce seuil sera élevée (en notant toutefois que plus cette valeur sera élevée plus les nœuds auront du mal à déterminer leurs positions par les règles).

3.3.3 MuR en étape préliminaire

Les règles de MuR (Method using Rules) résolvent l'ambiguïté lorsqu'un nœud peut se localiser en deux positions. Dès que l'ambiguïté est levée, le nœud devient à son tour une ancre et diffuse sa position.

Au début de cette section, MuR est présentée comme pouvant être exécutée en étape préliminaire par toutes les techniques de localisation. Toutefois, il est important d'attirer l'attention sur certains points. Chacune des règles considère deux cas : soit elle utilise une ancre exacte, soit une ancre estimée. Les techniques de localisation existantes n'ont pas cette notion d'ancres estimées. Par conséquent, lorsque MuR est exécutée en étape préliminaire par une autre technique de localisation, les calculs basés sur les ancres estimées sont supprimés. D'autre part, grâce aux zones géographiques définies pour chaque capteur, AT-Dist a la capacité de corriger certaines erreurs de MuR (par exemple celles dues aux erreurs de mesure) : si MuR attribue à un nœud une position incohérente par rapport à sa zone malgré le processus de vote, alors le nœud n'adoptera pas cette position. Si les méthodes de localisation n'ont pas la capacité de contrôler les positions attribuées aux capteurs, elles subiront les erreurs de mesure qui risquent en-

suite de se propager. L'efficacité de MuR en étape préliminaire est donc fortement liée à l'environnement du réseau. Les simulations de la section 3.9 mesureront cet impact.

3.4 AT-Angle : une méthode basée mesures d'angle

La section précédente a montré l'utilité pour les capteurs d'avoir des informations relatives aux mesures de distance. Cette section propose une technique de localisation nommée AT-Angle qui s'appuie non plus sur les distances mais sur les angles entre deux nœuds voisins ($\langle S, S, angle \rangle$).

3.4.1 Localisation exacte

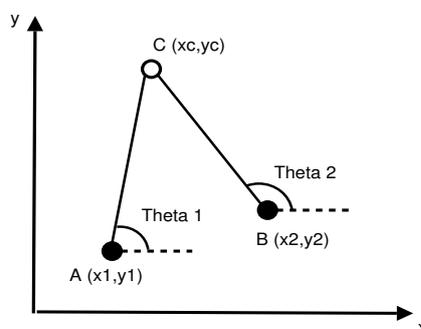


FIG. 3.10: Calcul d'un angle

Grâce à la connaissance des angles, un nœud peut se localiser exactement. En effet, si un capteur possède deux ancres dans son voisinage, il est capable de déduire sa position exacte.

Prenons l'exemple de la figure 3.10. Le nœud C cherche à calculer sa position (x_c, y_c) . A et B sont deux ancres voisines de C de coordonnées respectives (x_1, y_1) , (x_2, y_2) . C connaît les angles $\angle A, C = \theta_1$, $\angle B, C = \theta_2$. Les coordonnées (x_c, y_c) peuvent être calculées grâce au système suivant :

$$\frac{y_c - y_i}{x_c - x_i} = \tan(\theta_i) \quad \text{avec } i \in \{1, 2\} \quad (3.21)$$

Le nœud C devient alors une ancre et diffuse sa position. La section suivante décrit la technique d'approximation de la méthode AT-Angle.

3.4.2 Technique d'approximation

Une part du fonctionnement de cette technique est identique à la technique d'approximation d'AT-Free : au départ les ancres diffusent leurs positions et les nœuds ré-

cepteurs de ces messages estiment leurs distances avec ces ancres en multipliant leur rayon d'émission r par les nombres de sauts minima qui les séparent des ancres. Lorsqu'un nœud reçoit la position d'une ancre, deux cas se présentent :

- soit ils sont voisins et le nœud en déduit qu'il se situe à l'intérieur du rayon d'émission r de l'ancre ;
- soit ils ne sont pas voisins et, dans ce cas, le nœud en déduit qu'il se situe en dehors du rayon d'émission r de l'ancre mais à l'intérieur du disque centré en l'ancre de rayon $r \times h$ avec h le nombre de sauts entre le nœud et l'ancre.

L'intersection de ces disques forme une zone contenant le nœud et le centre de gravité de cette zone est considéré comme étant une estimation de sa position.

Les mesures d'angle étant très sensibles aux perturbations dues à l'environnement du réseau, la technique d'approximation doit utiliser ces données comme des indicateurs d'orientation et non comme des mesures exactes. Dans la technique d'approximation AT-Angle, une ancre ne diffuse plus seulement sa position mais aussi les angles qu'elle forme avec ses voisins directes (ancres ou non) ainsi qu'avec les autres ancres distantes (les angles sont alors calculés en fonction des positions des ancres).

Chaque mesure d'angle est reportée sur un des axes de référence (nord, sud, est, ouest). Par la suite, les angles seront reportés sur l'axe est. Il est fait comme hypothèse que l'ensemble des capteurs respecte cette convention.

Lorsqu'un capteur considère la position d'une ancre et, par exemple, un angle qu'elle forme avec un de ses voisins, il peut tracer une droite passant par la position de cette ancre dont l'inclinaison correspond à l'angle considéré. Ensuite, le nœud cherche à déterminer son appartenance à cette droite ou au côté de la droite auquel il appartient et, le cas échéant, fait suivre : la position de l'ancre, l'angle et sa position par rapport à cette droite. Si le nœud ne déduit aucune information alors il ne diffuse rien.

Considérons l'exemple décrit par la figure 3.11. L'ancre A diffuse sa position ainsi que l'angle $\angle A, X = \alpha$ qu'elle forme avec son voisin X . Lorsque X reçoit ces informations, il trace la droite d à l'aide de la position de A et de α , en déduit qu'il appartient à d et fait suivre à Y la position de A , α et son appartenance à la droite. A la réception du message de X , Y en déduit l'angle $\angle X, Y = \beta$ qu'il forme avec X . Il trace la droite d grâce à la position de A et α et, en fonction des valeurs de α et β , en déduit son appartenance au côté $S1$ car l'angle β ne respecte pas la condition suivante :

$$\alpha < \beta < \alpha + \pi \quad (3.22)$$

Si β avait respecté cette condition alors Y en aurait déduit son appartenance au côté $S2$. Y fait suivre à Z la position de A , α et son côté $S1$. Lorsque Z reçoit ce message, il mesure l'angle $\angle Y, Z = \gamma$ qu'il forme avec Y . En fonction des valeurs de α et γ et du côté de Y par rapport à d , Z tente de déterminer le côté de la droite auquel il appartient.

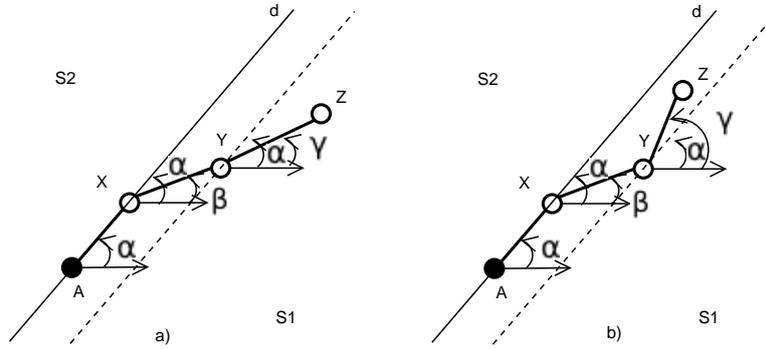


FIG. 3.11: a) Z déduit son côté b) Z ne déduit rien

Deux cas se présentent :

- Soit les angles α et γ ne respectent pas la condition 3.22 (figure 3.11a) et alors Z en déduit qu'il appartient au même côté S_1 que Y . Z fait suivre la position de A , α et son côté S_1 , et ainsi de suite ...
- Soit les angles α et γ respectent la condition 3.22 (figure 3.11b) et, dans ce cas, Z ne peut rien déduire. En effet, sans la connaissance des distances, Z ne sait pas s'il reste dans le côté S_1 ou bien s'il passe dans le côté S_2 .

Vulgairement, un nœud déduira son côté s'il confirme un « éloignement » par rapport à la droite. En cas de « rapprochement » le nœud ne peut pas conclure.

En ajoutant aux informations fournies par les cercles celles des côtés des droites formées à partir des positions des ancrs et des angles, les zones géographiques contenant les nœuds sont plus précises.

Pour résumer, chaque nœud $u \in V \setminus \Delta$ obtient sa zone Z_u comme suit :

Soit $S_d(u)$ le côté de u par rapport à la droite d obtenue à partir de la position d'une ancre et de l'angle α_d . $S_d(u)$ est défini ainsi :

$$S_d(u) = \begin{cases} S_1 & , \exists v \in N(u), v \in S_1 \mid \angle u, v < \alpha_d \text{ ou } \angle u, v > \alpha_d + \pi \\ S_2 & , \exists v \in N(u), v \in S_2 \mid \alpha_d < \angle u, v < \alpha_d + \pi \\ S_1 \cap S_2 & , \exists v \in N(u), v \in S_1 \cap S_2 \mid \angle u, v = \alpha_d \text{ ou } \angle u, v = \alpha_d + \pi \\ \emptyset & , \text{sinon} \end{cases}$$

Soit \mathcal{D} l'ensemble des droites construites à partir des positions des ancrs et des angles :

$$\mathcal{D} = \{d(a, \angle a, v) : \forall a \in \Delta, \forall v \in N(a) \cup \Delta \setminus \{a\}\} \quad (3.23)$$

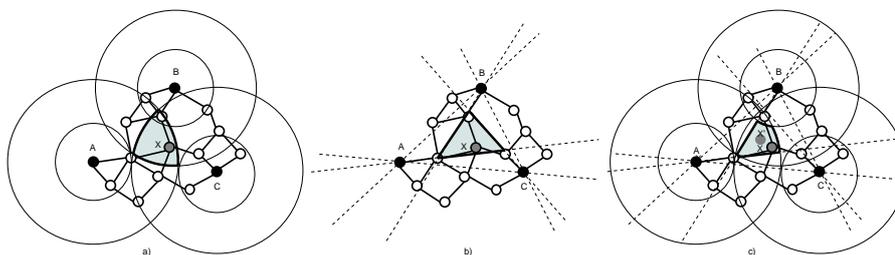


FIG. 3.12: Approximation avec : a) cercles b) droites c) les deux

Soit \mathcal{S}_u l'ensemble des côtés de u :

$$\mathcal{S}_u = \bigcup_{d \in \mathcal{D}} S_d(u) \quad (3.24)$$

La zone Z'_u de u , obtenue en fonction des droites, est définie comme suit :

$$Z'_u = \bigcap_{S \in \mathcal{S}_u} \{ (x_i, y_i) \in S \} \quad (3.25)$$

La zone Z_u de u , obtenue en fonction des droites et des cercles, est donnée par :

$$Z_u = Z'_u \cap Z''_u \quad (3.26)$$

avec Z''_u obtenue par 3.3.

La figure 3.12 est une illustration de la technique d'approximation. X est le nœud cherchant à estimer sa position et A, B, C sont des ancres. Les figures 3.12a, 3.12b, 3.12c représentent les zones (en gris) du nœud X en utilisant respectivement uniquement les cercles, les droites et ces deux informations. Finalement, X estime sa position comme étant le centre de gravité de la zone.

Comme dans les deux précédentes techniques, un nœud juge de la précision de sa position en fonction de sa borne d'erreur ϵ et devient une ancre estimée si cette borne passe en dessous d'un certain seuil. Comme la connaissance des distances dans AT-Dist, celle des angles dans AT-Angle permet également d'utiliser une faible valeur pour le seuil Γ telle que les nouvelles ancres ne diffuseront leurs positions qu'une seule fois ($\Gamma = \rho$).

3.5 Propriétés d'AT-Family

Chacune des méthodes d'AT-Family respecte deux propriétés très importantes qui ont un fort impact sur leurs performances :

- Premièrement, un nœud est capable de connaître la précision de sa position estimée et peut ainsi devenir une ancre. Dans chacune des méthodes, lorsqu'un nœud estime sa position, il déduit une borne de son erreur de position notée ϵ . Si cette borne est jugée petite alors le nœud considère être bien localisé, devient à son tour une ancre et diffuse sa position ainsi que son ϵ . Ainsi, les capteurs n'utilisent pas seulement les ancres exactes (équipées GPS par exemple) mais également les nœuds dont les positions estimées sont proches de leurs positions exactes. Cette propriété est très importante puisque la précision des positions dépend fortement du nombre d'ancres dans le réseau.
- Deuxièmement, un capteur est capable d'éliminer de fausses informations relatives à sa localisation. Grâce aux zones définies dans les méthodes d'AT-Family, les nœuds rejettent des informations si elles sont incohérentes. Par exemple, lorsqu'un nœud reçoit une information le localisant en dehors de sa zone géographique, il ne la prendra pas en considération. Les sources d'erreurs de localisation peuvent être dues à plusieurs phénomènes : les erreurs de mesure (de distances ou d'angles), les erreurs de position, les comportements byzantins, ... Avant de pouvoir éliminer certaines fausses informations, les nœuds doivent déduire leurs zones à partir des données de localisation (les positions des ancres et les mesures). Ces données pouvant être perturbées par des erreurs, les capteurs doivent donc s'assurer de la validité de leurs zones avant de commencer à éliminer de fausses informations. Il faudra attendre d'avoir reçu un certain nombre de données de localisation provenant des ancres avant qu'un capteur considère sa zone valide. Ce nombre doit garantir que la majorité des informations reçues n'a pas été perturbée par des erreurs et une fois atteint, le capteur pourra commencer à éliminer des informations. Il correspond au même seuil, dépendant de l'environnement du réseau, présenté dans le processus de vote et noté *confidence*. Par conséquent, lorsque le réseau est fortement (resp. faiblement) perturbé par des erreurs, sa valeur est élevée (resp. faible). Les simulations en section 3.9 analysent ce seuil en fonction des erreurs de mesure. Ces dernières étant le principal défaut des méthodes basées mesures, il est très intéressant de pouvoir les contrôler. Il est à noter que ces erreurs ne concernent pas AT-Free.

Ces deux propriétés ont un impact sur la précision des positions attribuées par les méthodes d'AT-Family. Elle ont une influence sur deux points essentiels qui garantissent de bons résultats : le nombre d'ancres pour la première propriété et l'élimination de certaines fausses informations pour la deuxième.

3.6 Implémentation

Dans l'implémentation des méthodes d'AT-Family, chaque nœud représente le réseau par une grille. Le côté d'une case de cette grille est égal à $r\sigma$ (avec σ un facteur multiplicatif). Pour garantir une bonne précision dans la représentation du réseau, σ

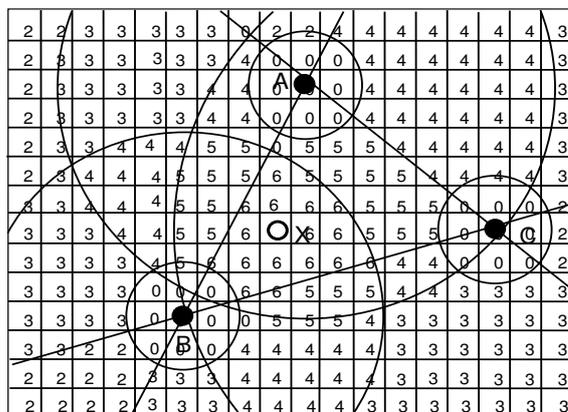


FIG. 3.13: Représentation du réseau par une grille

est initialisé à 0.01. Lorsqu'un nœud reçoit la position d'une ancre, il incrémente les cases dans la grille qui pourraient correspondre à sa position :

- si le nœud et l'ancre sont voisins, les cases considérées appartiennent :
 - au disque de centre l'ancre et de rayon r pour AT-Free et AT-Angle.
 - au cercle de centre l'ancre et de rayon la distance entre le nœud et l'ancre pour AT-Dist.
- si le nœud et l'ancre ne sont pas voisins, les cases incrémentées se situent entre les deux cercles de centre l'ancre et de rayons respectifs \hat{d}_1 et \hat{d}_2 tels que :
 - $\hat{d}_1 = r$ et $\hat{d}_2 = r \times h$ avec h le nombre de sauts minimum entre l'ancre et le nœud, pour AT-Free et AT-Angle.
 - $\hat{d}_1 = r$ et \hat{d}_2 la distance retournée par SumDist pour la méthode AT-Dist.

De plus, dans AT-Angle, lorsqu'un capteur définit son côté par rapport à une droite, toutes les cases appartenant à ce côté sont incrémentées.

La figure 3.13 est un exemple de grille pour AT-Angle : lorsque le nœud X reçoit la position de l'ancre A (resp. B, C), il incrémente toutes les cases entre les deux cercles centrés en A (resp. B, C) et de rayons respectifs r et $r \times h_A$ (resp. $r \times h_B, r \times h_C$) avec h_A (resp. h_B, h_C) le nombre de sauts minimum entre X et l'ancre A (resp. B, C). Il incrémente également toutes les cases appartenant à ses côtés par rapport aux droites passant par A, B et C . La zone contenant le nœud X est représentée par les cases de valeurs maximales. Dans la figure 3.13, cette zone est constituée des cases égales à 6. X calcule le centre de gravité de cette zone et obtient une estimation de sa position.

Remarque : Il est à noter qu'après avoir défini sa zone, un capteur ne conserve pas toute la matrice en mémoire mais seulement la partie correspondant à sa zone qui est mise à jour au fur et à mesure des arrivées d'informations de localisation des ancres.

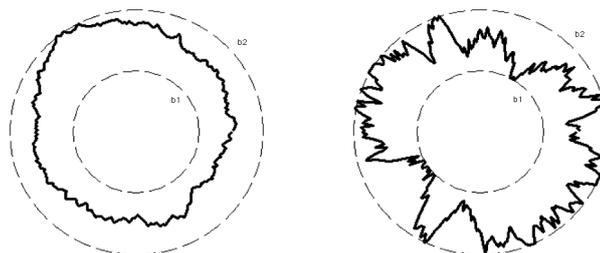


FIG. 3.14: Exemple de perturbations sur l'émission radio

3.7 Discussions

Assimiler la surface d'émission d'un capteur à un cercle parfait est une supposition forte. En effet, le recouvrement de l'émission peut être perturbé par des obstacles ou d'autres éléments contenus dans la zone de déploiement du réseau. Cependant, il n'existe pas de modélisation représentant le recouvrement d'une émission prenant en compte l'environnement du réseau. En analysant préalablement le terrain sur lequel les capteurs seront déployés, il sera possible de gérer ce phénomène avec les méthodes précédentes et même d'améliorer leurs performances en affinant la gestion des erreurs de mesure.

3.7.1 Cercle parfait

Dans les méthodes d'AT-Family, le problème posé par les cercles parfaits n'intervient que lorsqu'un capteur reçoit directement ou indirectement la position d'une ancre. S'il reçoit directement cette position alors il est certain d'être dans le rayon de recouvrement de l'ancre. En revanche, s'il ne le reçoit pas directement, cela ne veut pas dire pour autant que la distance entre lui et l'ancre est supérieure à r (il suffit qu'un obstacle empêche leur communication). Une première solution serait de ne pas utiliser cette propriété. Le problème serait en effet résolu au détriment de la précision de l'approximation des positions. La seconde solution consiste à faire une analyse préalable du terrain.

Le recouvrement des émissions d'un capteur dépend de nombreux paramètres (degré d'humidité, force du vent, présence d'obstacles, ...). A ce jour, il n'existe aucune modélisation de ces recouvrements et cela représente une difficulté supplémentaire pour les techniques de localisation. Toutefois, si une telle modélisation était possible alors il suffirait de substituer la représentation en cercles des émissions par cette modélisation et le principe des méthodes resterait identique.

La figure 3.14 donne l'exemple de deux recouvrements possibles pour un capteur ayant un rayon d'émission r .

Ce schéma remet en cause certaines hypothèses faites au début de ce chapitre :

- Si la distance entre deux capteurs est inférieure à r alors la communication entre ces nœuds n'est pas forcément assurée ;
- Les communications peuvent être unidirectionnelles.

Pourtant, en effectuant une analyse préalable du terrain de déploiement des capteurs, il est possible de gérer ces défauts. Après l'analyse des communications, deux bornes b_1 et b_2 respectivement inférieure et supérieure sont définies. Ces deux bornes encadrent la « frontière » ou la limite du recouvrement des capteurs. Par exemple, en figure 3.14, quelle que soit la limite du recouvrement d'un capteur, il est assuré qu'elle se situe entre ces deux bornes.

Considérons deux capteurs u et v . Si v reçoit un signal de u , il en déduit qu'il se trouve à l'intérieur du disque centré en u de rayon b_2 . À l'inverse, si v ne peut recevoir de signal de u , il en déduit qu'il se situe en dehors du disque centré en u de rayon b_1 . En effet, il est impossible que v soit à l'intérieur du disque de rayon b_1 sans recevoir le message.

Les méthodes décrites précédemment peuvent être adaptées afin de ne plus considérer seulement le rayon d'émission r mais aussi ces deux bornes. Prenons par exemple la situation suivante dans AT-Free : soit u un nœud cherchant sa position et A une ancre telle que $A \notin N_\Delta(u)$. Lorsque u applique la technique d'approximation, il en déduit qu'il se situe à l'intérieur du disque de centre A et de rayon $r \times h$ (où h est le nombre de sauts minimum séparant u de A) et qu'il se situe en dehors du disque de rayon b_1 .

3.7.2 Erreurs de mesure

Les erreurs de mesure sont fortement liées à l'environnement du réseau. Dans le cas d'un déploiement en champ libre, les erreurs de mesure seront faibles. À l'inverse, un champ contenant beaucoup d'obstacles entre les capteurs sera propice à des erreurs de mesure plus importantes. En analysant préalablement le champ de déploiement il est possible de trouver une borne de ces erreurs de mesure. Cette borne est notée ξ . En d'autres termes, lorsqu'un capteur u mesurera la distance d_{uv} qui le sépare d'un nœud voisin v , il sait que la distance exacte entre u et v est comprise entre $d_{uv} \pm \xi$.

Ainsi, cette borne d'erreur peut être gérée de la même manière que la borne d'erreur de position ϵ : lorsqu'un cercle de rayon r' est tracé par un capteur, il sera remplacé par deux cercles de rayons $r' \pm (\epsilon + \xi)$.

La distance estimée retournée par SumDist peut également être bornée en prenant en compte la borne ξ . Considérons un chemin x_0, x_1, \dots, x_q de longueur q . La distance estimée $d_{x_0x_q}$ de x_0 à x_q est bornée par :

$$\hat{d}_{x_0x_q} - q \times \xi \leq d_{x_0x_q} \leq \hat{d}_{x_0x_q} + q \times \xi \quad (3.27)$$

Cette gestion des erreurs de mesure rend le processus de vote de la méthode AT-Dist inutile pour ce type d'erreurs mais il reste toutefois nécessaire pour toutes les autres sources d'erreurs.

La gestion des erreurs de mesure s'applique également à la méthode AT-Angle : si le capteur u a la capacité de mesurer l'angle α_{uv} qu'il forme avec son voisin v , il sait que l'angle exact entre u et v est compris entre $\alpha_{uv} \pm \zeta$. Ainsi, les capteurs appliquant la technique d'approximation à partir de la position d'une ancre A , d'un angle α et de la borne d'erreur ζ , traceront deux droites d'inclinaisons $\alpha - \zeta$ et $\alpha + \zeta$ et déduiront le côté auquel ils appartiennent pour chacune de ces deux droites.

3.8 Extension à la troisième dimension

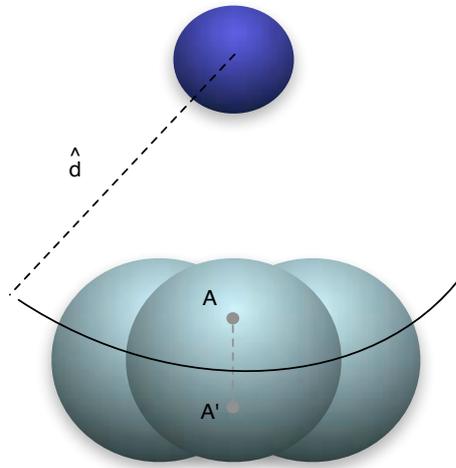


FIG. 3.15: Extension de la règle 1 à la troisième dimension

Les méthodes décrites précédemment supposent un champ d'étude à deux dimensions ce qui est suffisant pour un grand nombre d'applications (par exemple la surveillance des feux de forêt). Mais la localisation en trois dimensions est indispensable par exemple pour la localisation dans un bâtiment. En supposant que le recouvrement de l'émission d'un capteur puisse être représenté comme une sphère de rayon r , il est aisé d'étendre les méthodes précédentes à la troisième dimension. Les disques seront alors remplacés par des sphères.

Les règles d'AT-Dist doivent également être adaptées. Dans la deuxième dimension, un capteur est confronté aux cas d'ambiguïté concernant sa position lorsqu'il possède seulement deux ancrs dans son voisinage. Dans la troisième dimension, cette situation interviendra lorsqu'il en possèdera trois. L'intersection de trois sphères définit deux positions possibles pour le capteur. Les ancrs seront utilisées pour rompre l'ambiguïté avec les règles précédentes. La figure 3.15 représente l'extension de la règle 1 à la troisième dimension.

Ici encore, la représentation en sphères parfaites est une hypothèse forte.

3.9 Simulations

Cette section analyse les performances des méthodes d'AT-Family décrites précédemment par rapport aux méthodes existantes. AT-Free est comparée à la méthode libre de mesure HTRefine (Savarese et Rabaey, 2002). Les méthodes AT-Dist et AT-Angle sont comparées à trois autres méthodes basées mesures : APS (Niculescu et Nath, 2001), SumDistMinMax (Savvides et al., 2002) qui utilisent les mesures de distances entre les nœuds et APS_{AoA} (Niculescu et Nath, 2003a) qui s'appuie sur les mesures d'angles. Les simulations montrent également l'influence d'AT-Free lorsqu'elle est exécutée en étape préliminaire par d'autres techniques de localisation. Enfin, la capacité de MuR à augmenter le nombre d'ancres est mise en évidence.

3.9.1 Environnement des simulations

Les simulations des différentes méthodes ont été réalisées sur le simulateur créé par Langendoen et Reijers dans (Langendoen et Reijers, 2003). Il est basé sur OMNET++ qui est un simulateur à événements discrets (Varga, 2001). La couche MAC est considérée parfaite et les transmissions des messages se font sans perte.

Afin de faciliter la compréhension des résultats de simulations, les erreurs de position sont normalisées par rapport au rayon de transmission r . Par exemple, si un nœud est localisé avec une erreur de 50%, cela signifie que la distance entre sa position exacte et sa position estimée est égale à $\frac{r}{2}$. Les erreurs de mesure de distances sont également normalisées par rapport à r . Par contre, les erreurs de mesure d'angles sont normalisées par rapport à π . Par exemple, une erreur de 50% dans la mesure d'un angle θ signifie que l'angle exact appartient à l'intervalle $\theta \pm \frac{\pi}{2}$. Le pourcentage des erreurs de mesure (de distances ou d'angles) est noté δ .

Chaque topologie générée dépend du nombre de capteurs et du rayon de transmission. Les capteurs sont répartis aléatoirement avec une distribution uniforme dans une aire $\mathcal{A} = 100 \times 100$. Par défaut, le nombre de capteurs n est fixé à 150 et le rayon de transmission r à 14 ce qui représente une densité en capteurs égale à 9.24.

La densité d d'un réseau de capteurs représente le nombre moyen de voisins pour un nœud. Elle est obtenue par l'équation suivante :

$$d = \frac{n\pi r^2}{\mathcal{A}} \quad (3.28)$$

Par la suite, les simulations mettront en évidence l'influence des paramètres suivants sur les performances des méthodes :

- La densité du réseau ;
- Les erreurs de mesure δ qui prendront les valeurs 0%, 5%, 10% ;

- Le pourcentage des ancres localisées exactement noté α . Ces dernières sont sélectionnées aléatoirement parmi les nœuds du réseau.

La qualité de la précision des positions attribuées par les méthodes est jugée en fonction du comportement de l'erreur moyenne des positions des nœuds localisés sans considérer les ancres localisées au départ (les capteurs équipés GPS). En d'autres termes, l'erreur moyenne considérée est obtenue en faisant la somme des erreurs de position, divisée par le nombre de nœuds sans compter les ancres déjà localisées.

Chaque scénario est exécuté 100 fois ce qui permet d'obtenir des écarts types relativement faibles. D'autre part, sur chacun des graphes, les intervalles de confiance sont représentés pour chaque valeur moyenne reportée. La taille de ces intervalles garantit que les valeurs réelles leurs appartiennent avec une probabilité de 0.95.

3.9.2 Résultats

L'analyse des performances d'AT-Family porte tout d'abord sur les méthodes libres de mesure puis sur celles basées mesures.

Méthodes libres de mesure

Dans cette partie, le pourcentage d'ancres α varie tel que $\alpha \in \{5, 10, \dots, 35, 40\}\%$, ce qui représente une densité en ancres allant de 0.46 à 3.7.

Tout d'abord, AT-Free est paramétrée pour être utilisée comme une méthode de localisation à part entière. Son analyse en tant que méthode préliminaire d'autres méthodes de localisation sera décrite plus loin dans cette section. Ainsi, les valeurs des paramètres Γ , ρ , k et λ sont définies comme suit :

- la valeur de ρ est fixée à $0.01 \times r$, représentant une erreur de position de 1%. En dessous de ce seuil, un capteur est considéré comme étant très bien localisé ce qui a pour effet de stopper le calcul et la diffusion de sa position.
- la valeur du seuil Γ a été définie par simulations. Ces simulations ont montré que la valeur de ce seuil est proche de $\frac{r}{d}$, où d représente la densité en ancres. Il est clair que ce seuil est inversement proportionnel à la densité en ancres du réseau : plus il y a d'ancres, plus la valeur de Γ en dessous de laquelle un capteur devient une ancre sera choisie petite. A l'inverse, s'il n'y a pas beaucoup d'ancres dans le réseau, une valeur plus grande de Γ est souhaitable. Autrement, une petite valeur de Γ impliquerait un faible taux de capteurs qui deviendraient des ancres et de ce fait diminuerait la quantité d'informations de localisation.
- le nombre de diffusions k sera choisi dans l'ensemble $\{1, 5, 10\}$.
- la valeur de λ (le facteur multiplicatif qui définit la fréquence d'envoi des positions des ancres) sera définie par l'équation 3.9.

Le premier graphe en figure 3.16 représente le taux de l'erreur moyenne en fonction du nombre d'ancres. Il contient quatre courbes représentant respectivement les perfor-

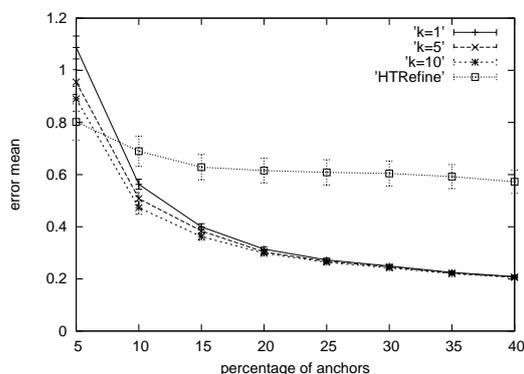


FIG. 3.16: Taux de l'erreur moyenne de position

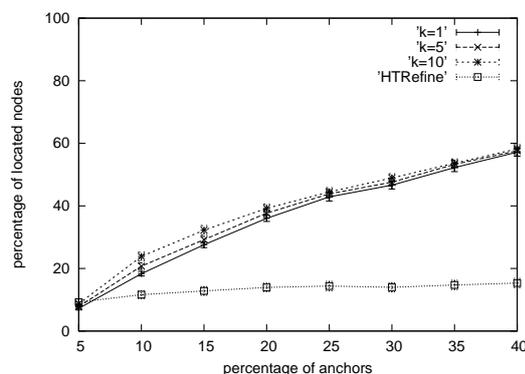


FIG. 3.17: Pourcentage de nœuds bien localisés

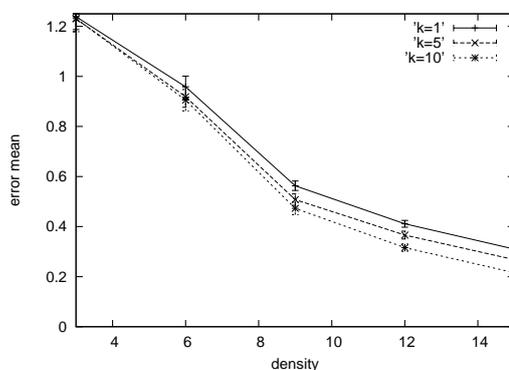


FIG. 3.18: Comportement de l'erreur moyenne de position en fonction de la densité du réseau

mances d'AT-Free avec $k = \{1, 5, 10\}$ et celles d'HTRefine. Sans surprise, plus le réseau contient des ancres localisées avec exactitude au départ (nœuds équipés GPS), plus la précision des positions s'améliore et ce quelle que soit la valeur de k . L'écart important entre les résultats d'AT-Free et ceux d'HTRefine est significatif et met en évidence les performances d'AT-Free. Il est intéressant de noter qu'à partir d'un α supérieur à 25%, le choix de k n'a plus d'influence sur les résultats. Avec une forte densité d'ancres, le nombre d'informations de localisation diffusées dès le départ est déjà conséquent ; c'est pourquoi, une faible valeur de k sera tout à fait pertinente dans cette configuration. A l'inverse, dans une configuration à faible densité d'ancres, l'augmentation de la valeur de k ajoutera des informations de localisation. Enfin, il apparaît que le choix d'un pourcentage d'ancres supérieur à 30-35% n'améliore pas significativement les résultats.

Le second graphe en figure 3.17 représente le pourcentage de nœuds localisés par AT-Free avec une erreur de position inférieure à 20%. En dessous de ce pourcentage, la position est considérée relativement précise. Il s'agit de mettre en évidence la capacité d'AT-Free à localiser des nœuds avec précision. En se focalisant sur ce critère, il ressort que le choix de la valeur de k n'a qu'une faible influence sur les résultats.

La figure 3.18 analyse l'impact de la densité en nœuds sur les performances d'AT-

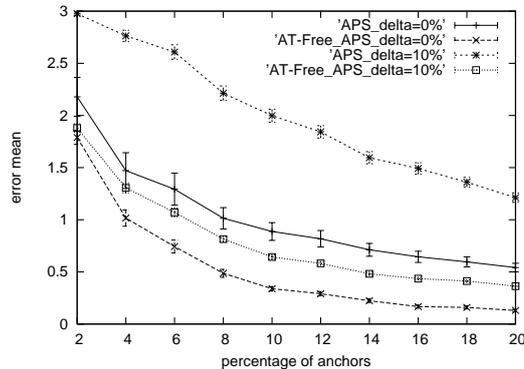


FIG. 3.19: APS avec ou sans AT-Free

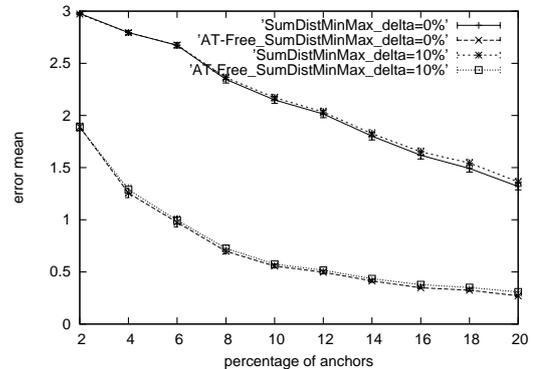


FIG. 3.20: SumDistMinMax avec ou sans AT-Free

Free. Elle varie ici de 3 (ce qui représente une faible densité) à 15 (ce qui représente une forte densité). Pour ces simulations, le pourcentage d’ancres est fixé à 10%. Sur ce graphe, les positions attribuées par AT-Free en faible densité ne sont pas très précises ce qui s’explique par le manque de contraintes à satisfaire imposées par les relations de voisinage et les positions des ancres. En revanche, plus la densité augmente, plus la précision des positions attribuées est améliorée. En fait, l’accroissement de la densité en nœuds ajoute des contraintes de voisinage et, en fonction de la valeur de k , davantage d’informations sur ces contraintes sont transmises. Par conséquent, en augmentant la densité, les nœuds peuvent améliorer nettement leurs positions.

AT-Free en étape préliminaire

Les simulations suivantes mettent en évidence l’intérêt d’exécuter AT-Free en étape préliminaire par d’autres méthodes de localisation. Elles analysent les résultats des trois méthodes APS, SumDistMinMax (basées mesures) et HTRefine (libre de mesure) avec ou sans AT-Free en étape préliminaire. Il s’agit de mettre en exergue les points sur lesquels AT-Free, en étape préliminaire, apporte sa contribution pour des méthodes libres ou basées mesures.

Afin de garantir une faible consommation d’énergie, AT-Free est paramétrée de telle sorte que le nombre maximum de diffusions soit égal à 2 ($k = 2$). La valeur de k est volontairement choisie petite afin de mettre en avant les améliorations des méthodes en exécutant AT-Free en étape préliminaire malgré ce choix.

Le premier graphe, représenté en figure 3.19, contient quatre courbes. Elles représentent le taux de l’erreur moyenne des positions attribuées par la méthode APS avec ou sans AT-Free en étape préliminaire et en considérant une erreur de mesure prenant comme valeurs 0 et 10%. En considérant dans un premier temps les résultats avec une erreur de mesure égale à 0%, la contribution d’AT-Free en étape préliminaire est notable. Dès lors que des erreurs de mesure sont introduites (ici 10%) elle devient importante. Ce premier exemple souligne la capacité d’AT-Free à éliminer de fausses informations dues aux erreurs de mesure pour une méthode basée mesures.

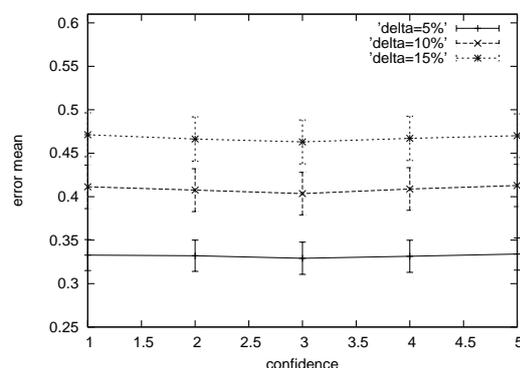
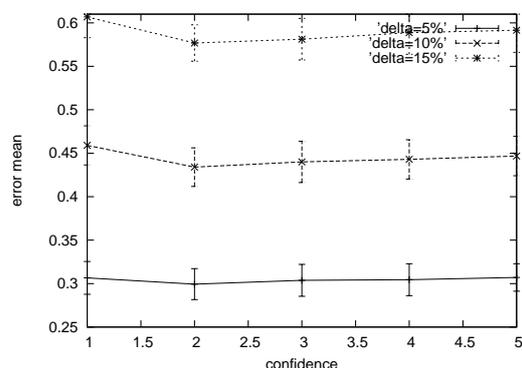


FIG. 3.21: AT-Dist : impact du seuil confidence FIG. 3.22: AT-Angle : impact du seuil confidence

Le second graphe, représenté en figure 3.20, montre l'impact d'AT-Free en étape préliminaire pour la méthode SumDistMinMax. Dans un premier temps, il est nécessaire de constater que les performances de SumDistMinMax sont proches avec ou sans la présence d'erreurs de mesure, mais dans les deux cas elles ne sont pas satisfaisantes. En appliquant AT-Free en étape préliminaire, les résultats sont fortement améliorés sans noter, ici encore, de grande différence avec ou sans erreur de mesure. Par conséquent, la contribution d'AT-Free n'intervient pas dans l'élimination des erreurs dues aux mesures. En fait, dans cette configuration, AT-Free corrige la méthode elle-même. Il est bien connu que certaines méthodes sont plus ou moins efficaces selon la densité du réseau. Or, SumDistMinMax obtient ses meilleurs résultats en forte densité ou bien en présence d'un pourcentage d'ancres plus important que celui utilisé ici.

Ainsi, AT-Free peut apporter une amélioration aux résultats des méthodes de localisation en fonction de l'environnement du réseau. Toutefois, au regard de l'inclinaison des courbes représentant SumDistMinMax seule et celle où AT-Free est exécutée en étape préliminaire, on constate que l'utilité d'AT-Free en étape préliminaire diminue au fur et à mesure de l'augmentation du pourcentage d'ancres dans le réseau.

Méthodes basées mesures

Cette partie analyse les performances des deux méthodes basées mesures AT-Dist et AT-Angle. Les simulations sont exécutées avec un pourcentage d'ancres α qui varie telle que $\alpha \in \{2, 4, \dots, 18, 20\}\%$ ce qui représente une densité en ancres de 0.12 à 1.23.

A cause des erreurs de mesure ou d'autres sources d'erreurs, un capteur ne peut faire confiance à une seule ancre. C'est la valeur du seuil *confidence* qui détermine le nombre d'ancres à partir duquel un capteur considère les données de localisation fiables. Les graphes des figures 3.21 et 3.22 analysent les performances respectives d'AT-Dist et AT-Angle en fonction de la valeur de ce seuil. Dans ces simulations, seules des erreurs de mesure sont considérées. Le pourcentage d'ancres est fixé à 10% et le pourcentage d'erreurs de mesure prendra les valeurs 5%, 10% et 15%. Pour chaque pourcentage considéré, il ressort que la meilleure valeur du seuil *confidence* soit 2 pour AT-Dist

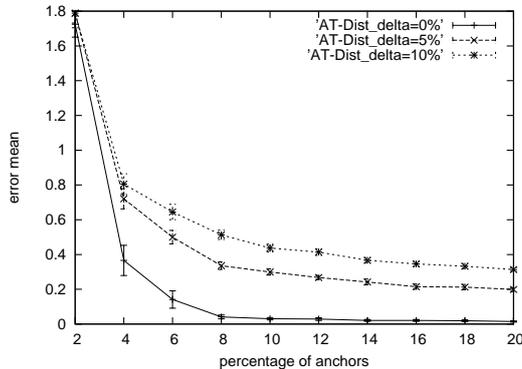


FIG. 3.23: AT-Dist : taux de l'erreur moyenne

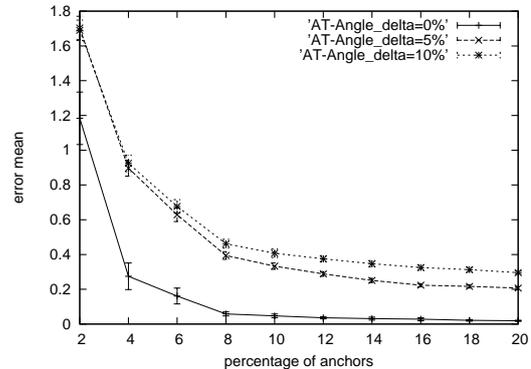


FIG. 3.24: AT-Angle : taux de l'erreur moyenne

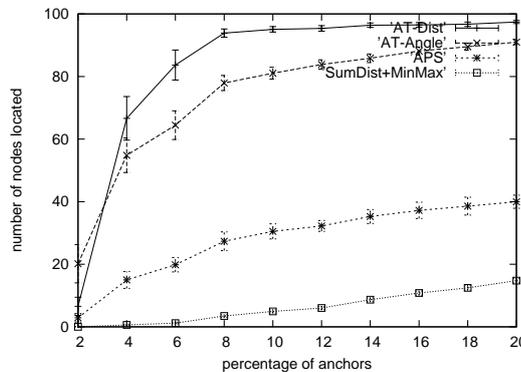


FIG. 3.25: AT-Dist et AT-Angle : pourcentage de nœuds localisés avec une erreur de position inférieure à 20% avec $\delta = 0\%$

et 3 pour AT-Angle. Ce sont ces valeurs qui seront utilisées par la suite.

Les graphes des figures 3.23 et 3.24 représentent les performances respectives d'AT-Dist et AT-Angle en fonction du pourcentage d'ancres dans le réseau et en considérant des erreurs de mesure telles que $\delta = \{0,5,10\}\%$. Sans surprise, la précision des positions diminue dès lors que les erreurs de mesure augmentent. Sans erreur de mesure, les positions attribuées aux capteurs sont très proches des positions réelles et ce dès 8% d'ancres dans le réseau. Il faut souligner toutefois une nette perturbation entre les performances des méthodes entre 0 et 5% d'erreurs de mesure, alors que cet écart diminue entre 5 et 10%. Cela signifie que dès lors que des erreurs de mesure sont introduites, les méthodes parviennent à limiter leur impact sur les positions. Malgré ces erreurs de mesure, les erreurs de position passent rapidement en dessous de 50% avec seulement 10% d'ancres dans le réseau. Enfin, il apparaît qu'après 14% d'ancres dans le réseau, les résultats se stabilisent. En conclusion, ces simulations montrent la qualité des positions attribuées par les méthodes et particulièrement sans erreur de mesure où les positions sont quasi-exactes. Toutefois, la précision de ces positions reste raisonnable malgré l'introduction des erreurs de mesure.

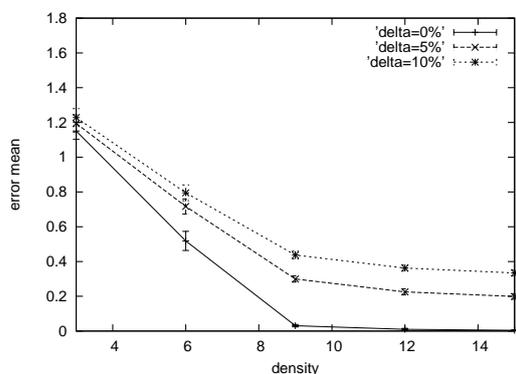


FIG. 3.26: AT-Dist : impact de la densité

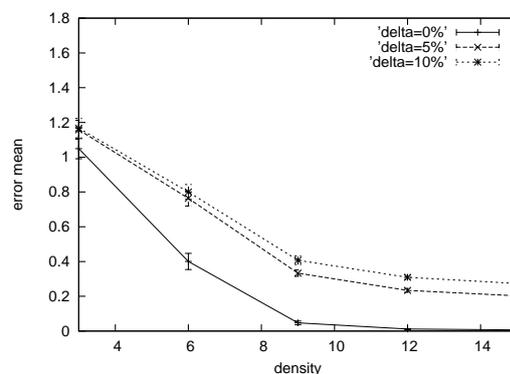


FIG. 3.27: AT-Angle : impact de la densité

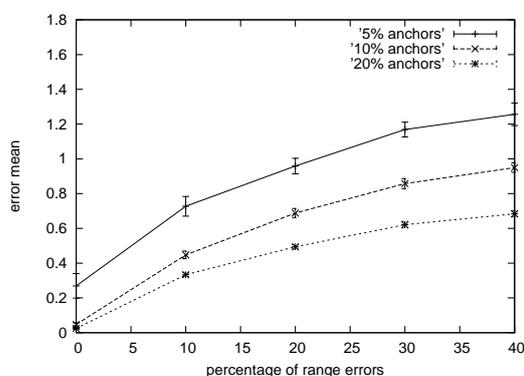


FIG. 3.28: AT-Dist : impact des erreurs de distance

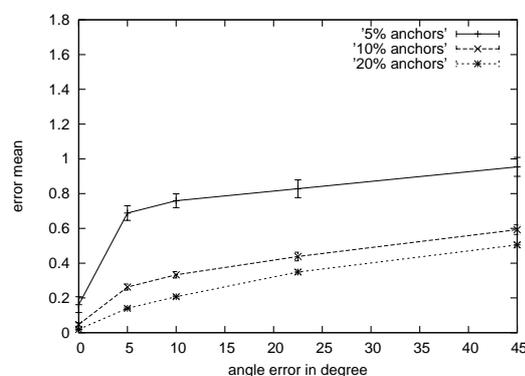


FIG. 3.29: AT-Angle : impact des erreurs d'angle

Pour souligner la capacité des méthodes à localiser avec précision les capteurs, il faut se reporter au graphique de la figure 3.25 qui compare le nombre de nœuds localisés avec précision en fonction du pourcentage d'ancres pour les méthodes AT-Dist, AT-Angle, APS et SumDistMinMax. Pour AT-Dist et AT-Angle, les résultats sont très nets : le pourcentage de nœuds localisés avec une erreur de position inférieure à 20% dépasse très nettement les 80 puis 90% pour un pourcentage d'ancres variant de 2 à 20. Les deux précédents graphes et celui-ci témoignent des excellents résultats de nos méthodes de localisation.

Les figures 3.26 et 3.27 montrent l'impact de la densité sur AT-Dist et AT-Angle pour un pourcentage d'ancres fixé à 10. Comme dans AT-Free, plus cette densité augmente, plus les résultats sont améliorés, quel que soit le pourcentage d'erreurs de mesure considéré. Ceci s'explique de la même manière que pour AT-Free. L'augmentation de la densité et par conséquent, les relations de voisinage impliquent plus de contraintes sur les positions des nœuds et font converger les estimations des positions vers les positions réelles. Enfin, il semble qu'après une densité égale à 12 les résultats se stabilisent.

Le dernier point à analyser concerne l'impact des erreurs de mesure. Les deux graphes des figures 3.28 et 3.29 représentent les performances des méthodes AT-Dist

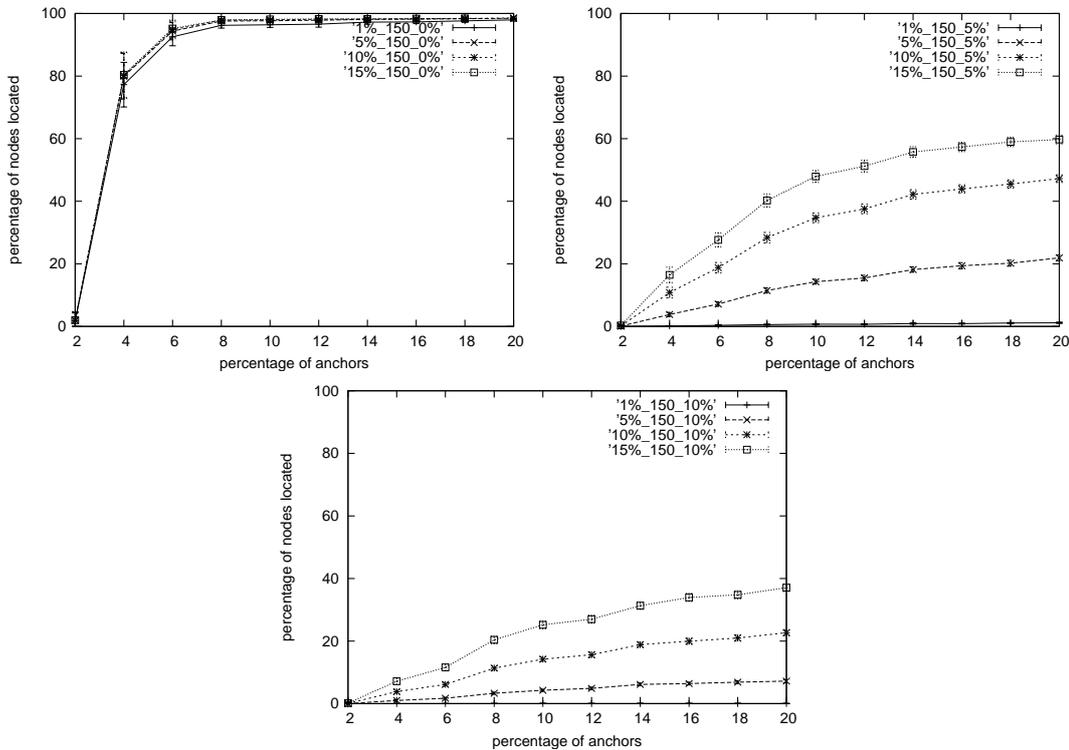


FIG. 3.30: Ajout d'ancres dans le réseau avec la méthode MuR, pour $\delta = 0, 5, 10\%$

et AT-Angle en faisant varier le pourcentage d'erreurs de mesure pour le premier (δ variant de 0% à 40%) et le degré d'erreurs pour le deuxième (δ variant de 0° à 45°). Chaque graphe contient trois courbes représentant respectivement des pourcentages d'ancres de 5, 10 et 20%. Sur la figure 3.29, les courbes obtenues montrent que l'impact des erreurs de mesure sur les erreurs de position diminue au fur et à mesure que ces premières augmentent. Ce constat ne peut être repris en figure 3.28 où chaque augmentation des erreurs de mesure implique une diminution sensible de la précision des positions. Ainsi, après 25% d'erreurs de mesure, le pourcentage des erreurs de position dépasse les 100%. Ces deux figures montrent les limites des méthodes AT-Dist et AT-Angle.

MuR : ajout d'ancres

Cette partie se focalise sur la capacité de la méthode MuR à ajouter des ancres dans le réseau. Chacun des trois graphes de la figure 3.30 contient quatre courbes. Elles représentent le pourcentage d'ancres ajoutées avec une erreur de position inférieure à 1, 5, 10 et 15% en fonction du pourcentage d'ancres localisées dès le départ (ancres équipées GPS).

Le premier graphe considère un réseau sans erreur de mesure ($\delta = 0\%$). Un très grand nombre d'ancres générées en appliquant MuR est localisé avec une erreur de

position inférieure à 1%. Dans cette configuration, MuR peut être considérée comme une méthode de localisation à part entière.

Le second graphe considère un pourcentage d'erreurs de mesure égal à 5%. L'introduction de ces erreurs perturbe considérablement les résultats de MuR. Ce phénomène est confirmé dans le troisième graphe avec un pourcentage d'erreurs de mesure égal à 10%. Toutefois, il est intéressant de noter que MuR ajoute plus de 50% (resp. 30%) d'ancres localisées avec des erreurs de mesure inférieures à 15% à partir d'un pourcentage d'ancres égal à 10% dans le second (resp. troisième) graphe. Comme précisé dans la section consacrée à MuR, les méthodes qui l'utilisent en étape préliminaire doivent être capables de contrôler les erreurs de mesure, sans quoi MuR serait inutile en étape préliminaire.

3.9.3 Discussion sur les simulations

Les résultats des simulations fournissent une vision précise des performances des méthodes d'AT-Family. Ils témoignent de leurs efficacités à localiser les nœuds avec précision y compris pour la méthode libre de mesure AT-Free avec, sans surprise, de meilleurs résultats pour les méthodes basées mesures. Toutefois, malgré un environnement perturbé, les résultats des différentes méthodes sont concluants. Bien que ces erreurs soient contrôlées, les méthodes ne peuvent plus assurer une localisation précise en présence de fortes perturbations, ce qui met bien en évidence les limites des méthodes basées mesures qui dépendent, au delà de l'environnement du réseau, de la qualité des matériaux de mesures utilisés¹.

3.10 Conclusion

Ce chapitre propose trois techniques de localisation AT-Free, AT-Dist et AT-Angle pour les réseaux de capteurs statiques qui se basent sur deux propriétés. Tout d'abord, chaque capteur connaît une borne de l'erreur de sa position et devient une ancre estimée lorsqu'il est localisé avec précision. Cette notion d'ancre estimée est majeure car elle accroît la quantité d'informations contribuant à la localisation des autres capteurs. D'autre part, plutôt que de chercher à déterminer directement les positions des capteurs, ces méthodes délimitent des zones les contenant et en déduisent leurs positions estimées. Cette approche contribue à éliminer des données de localisation si celles-ci sont incohérentes par rapport à ces zones. Cette dernière propriété est intéressante, notamment pour atténuer l'impact des erreurs de mesure qui est le principal défaut des méthodes basées mesures.

Toutefois, ces méthodes ne sont pas exemptes de défauts. Si les erreurs de mesure sont contrôlées jusqu'à un certain niveau, au delà, la précision des positions devient

¹L'amélioration des mesures de distance ou d'angle est un domaine de recherche à part entière en micro-électronique

insuffisante. Or, ce niveau d'erreur n'est pas marginal. La représentation du recouvrement du rayon d'émission en disque est également discutable. Seule une analyse préalable du terrain pourra corriger ces défauts. En effet, trouver une méthode qui garantisse des positions précises quel que soit l'environnement du réseau semble difficile voir impossible sans un minimum de connaissances relatives à cet environnement. Chaque méthode proposée dans ce chapitre doit donc être considérée comme une méthode à part entière si l'environnement du réseau le permet, sinon comme un socle sur lequel seront ajoutées les spécificités liées à l'environnement.

Chapitre 4

ATM-Family : une extension vers la mobilité

Ce chapitre propose une extension au contexte de mobilité, nommée ATM-Family (Family of Approximation Techniques in Mobile context), des méthodes de localisation décrites précédemment. La mobilité des capteurs peut prendre les trois formes suivantes :

- les capteurs et les ancres sont mobiles ($\langle M, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$);
- les capteurs sont statiques et les ancres mobiles ($\langle S, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$);
- les capteurs sont mobiles et les ancres statiques ($\langle M, S, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$).

Dans la littérature, la configuration la plus étudiée est celle où les capteurs sont statiques et les ancres mobiles. Ces ancres sont souvent des robots ou des humains qui utilisent une stratégie de déplacement dans le réseau afin de contribuer à la localisation des autres nœuds. Les articles (Priyantha et al., 2005; Bulusu et al., 2001) en sont des exemples. Les autres configurations liées à la mobilité, notamment celles considérant des capteurs indépendants entre eux (sans stratégie de déplacement des ancres pour aider à la localisation), n'ont jamais été étudiées.

L'extension des méthodes proposées dans le chapitre précédent répond aux trois configurations en utilisant des capteurs n'ayant aucune capacité de mesure ou bien pouvant mesurer les distances ou les angles avec leurs voisins.

La mobilité dans les réseaux de capteurs ajoute un problème supplémentaire : étant données les limites de calculs et de communications dues à la contrainte énergétique, les capteurs ne peuvent se permettre de se localiser de façon continue. Il s'agit donc de définir les dates auxquelles un capteur invoquera le calcul de sa position afin de maintenir un niveau de précision des positions satisfaisant tout en économisant de l'énergie.

Dans (Tilak et al., 2005), les auteurs proposent trois stratégies d'ordonnement des dates (SFR - Static Fixed Rate, DVM - Dynamic Velocity Monotonic et MADRD - Mobility Aware Dead Reckoning Driven) et se focalisent uniquement sur cette question. En d'autres termes, le problème de la localisation des capteurs n'est pas traité puisque

les auteurs supposent qu'un capteur se localise exactement lorsqu'il invoque le calcul de sa position (tous les capteurs sont des ancres). Ces stratégies seront expliquées ci-après.

Pour répondre au problème de la localisation dans un contexte mobile, les méthodes de localisation AT-Free, AT-Dist et AT-Angle sont étendues à la mobilité et les stratégies d'ordonnement des dates SFR, DVM et MADRD sont modifiées afin de prendre en compte des positions estimées.

4.1 Stratégie d'ordonnement

Dans un contexte de mobilité, un capteur ne peut invoquer le calcul de sa position de façon continue à cause de la contrainte énergétique. Pour répondre à ce problème, il est nécessaire de définir une stratégie d'ordonnement des dates auxquelles les capteurs calculeront leurs positions tout en maintenant un niveau de précision raisonnable. Cette section décrit les trois stratégies d'ordonnement proposées dans (Tilak et al., 2005) où les auteurs supposent qu'un capteur obtient sa localisation exacte lorsqu'il invoque le calcul de sa position.

4.1.1 SFR (Static Fixed Rate)

La stratégie SFR (Static Fixed Rate) est basée sur un raisonnement simpliste : dans cette méthode, chaque capteur invoque le calcul de sa position après l'écoulement d'une période fixe t_{sfr} . Ainsi, lorsqu'un capteur calcule sa position au temps t , il obtient une position (x_t, y_t) et effectuera le prochain calcul de sa position au temps $t + t_{sfr}$. Enfin, entre les temps t et $t + t_{sfr}$, le capteur se considère localisé en (x_t, y_t) .

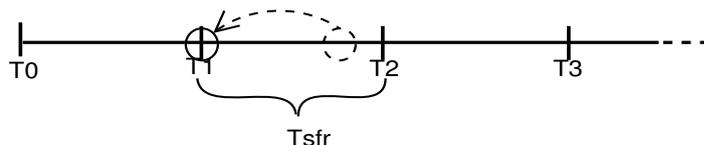


FIG. 4.1: SFR

Sur l'exemple de la figure 4.1, les temps $t_1, t_2, t_3 \dots$ respectent la période fixée t_{sfr} . Lorsque le capteur se déplacera entre les temps t_1 et t_2 par exemple, sa position estimée sera celle calculée en t_1 .

Cette stratégie est simple mais présente un défaut majeur puisqu'elle ne prend pas en compte la mobilité du capteur lors du calcul de la période t_{sfr} . En effet, si un capteur est à l'arrêt, il est inutile qu'il continue à calculer sa position. Pourtant, à chaque période t_{sfr} , il invoquera le calcul de sa position entraînant ainsi une consommation d'énergie supplémentaire. A l'inverse, si la vitesse de déplacement du capteur est élevée ou bien si la trajectoire de son déplacement n'est pas en ligne droite, le capteur aura tout intérêt

à invoquer fréquemment le calcul de sa position afin de maintenir un bon niveau de précision, ce qui n'est pas le cas dans cette stratégie d'ordonnancement.

4.1.2 DVM (Dynamic Velocity Monotonic)

A l'inverse de SFR, la stratégie DVM (Dynamic Velocity Monotonic) base son ordonnancement sur la mobilité des capteurs : plus la vitesse du capteur augmente (resp. diminue), plus la période t_{dvm} diminue (resp. augmente), ce qui maintient un niveau d'erreur de position raisonnable.

Un capteur calcule une estimation de sa vitesse en fonction des deux dernières positions qu'il a obtenu. En divisant la distance entre ces deux positions par la période t_{dvm} séparant les temps de calcul de celles-ci, il obtient une estimation de sa vitesse actuelle et peut ordonnancer son prochain temps de calcul de sorte à maintenir le niveau de précision souhaité. Cela suppose que le capteur ne changera pas de vitesse jusqu'au prochain temps. Ensuite, comme dans SFR, si un capteur obtient sa position à un temps t , il considérera cette position comme étant la sienne jusqu'au prochain temps $t + t_{dvm}$.

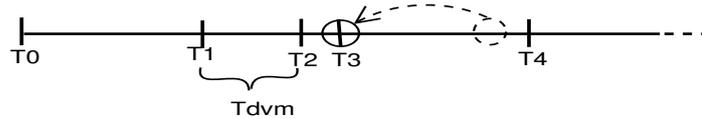


FIG. 4.2: DVM

La figure 4.2 présente un exemple d'exécution de DVM. Les différents temps t_1 , t_2 , t_3 ... sont calculés en fonction de la vitesse du capteur. Par exemple, pour déterminer le temps t_3 , le capteur utilise les positions obtenues aux temps t_1 et t_2 . La vitesse du capteur ayant augmenté entre ces deux temps, la période t_{dvm} est raccourcie pour obtenir le temps t_3 . Par contre, puisque la vitesse diminue entre t_2 et t_3 , t_{dvm} est allongée pour obtenir le temps t_4 et ainsi de suite, ...

DVM trouve ses limites en ne prenant pas en compte les trajectoires des capteurs dans sa stratégie d'ordonnancement des dates.

4.1.3 MADRD (Mobility Aware Dead Reckoning Driven)

La stratégie MADRD (Mobility Aware Dead Reckoning Driven) est un protocole prédictif qui base son ordonnancement des temps de calcul sur la vitesse du capteur mais aussi sur sa trajectoire ce qui lui permet de prédire sa localisation au cours du temps. Comme dans DVM, l'estimation de la vitesse s'effectue en fonction des positions calculées lors des deux derniers temps. Mais, à partir de ces données, une estimation de la trajectoire du capteur est également déduite. Ainsi, durant la période t_{madr} , le capteur peut calculer une estimation de sa position en se basant sur la prédiction de sa mobilité. Lorsqu'il calcule à nouveau sa position, il vérifie la validité de sa prédiction

en constatant l'écart entre sa nouvelle position et celle prédite. La valeur de cet écart est comparée à un seuil qui traduit la qualité de la prédiction. L'ordonnancement du prochain temps de calcul de la position du capteur dépendra de la qualité de la prédiction : si elle est jugée bonne (l'écart est inférieur au seuil), le capteur continue à utiliser la prédiction pour estimer sa position et redéfinir la valeur de la période t_{madr} ; si elle est mauvaise, le prochain temps de calcul sera proche afin de refaire une prédiction.

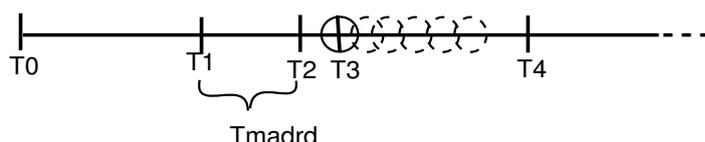


FIG. 4.3: MADRD

La figure 4.3 est une illustration de cette stratégie d'ordonnancement : après les temps t_1 et t_2 , le capteur vérifie la validité de la trajectoire prédite entre ces deux temps et ordonne t_3 . Même chose pour le temps t_4 avec les temps t_2 et t_3 . Au cours de son déplacement, le capteur estimera sa position en fonction de la prédiction qu'il a calculé.

Cette méthode est très intéressante puisqu'en présence de prédictions parfaites, la fréquence de calcul de la position d'un nœud sera très faible. Mais même lorsqu'elles ne le sont pas, cette stratégie maintient un bon niveau de précision des positions tout en prenant en compte la contrainte énergétique.

4.1.4 Conclusion sur ces stratégies

Les auteurs basent leurs travaux sur des réseaux dont les capteurs ont la capacité de calculer leurs positions réelles (tous les capteurs sont des ancres). De par cette hypothèse, ils souhaitent se focaliser uniquement sur l'étude de la stratégie d'ordonnancement des dates de calcul des positions des capteurs et concluent que la meilleure stratégie d'ordonnancement est MADRD suivie de DVM et enfin SFR. Cette hypothèse forte incite à se poser la question suivante : cette conclusion se généralise-t-elle dès lors que des erreurs de position sont introduites ? D'autre part, il faut rappeler que cette étude se restreint au modèle de mobilité où les capteurs et les ancres sont mobiles.

Plus loin dans ce chapitre, la conclusion de ces travaux est remise en cause en considérant des capteurs localisés avec des erreurs de position (seuls quelques nœuds sont des ancres) dans différentes configurations de mobilité du réseau (ancres et capteurs mobiles, ...).

4.2 ATM-Family

Cette section présente l'extension ATM-Family (Family of Approximation Techniques in Mobile context) des techniques d'approximation décrites dans le chapitre précédent.

Selon la forme de mobilité des capteurs, l'extension varie légèrement. Ainsi, les explications qui vont suivre considèrent la configuration de mobilité où les capteurs et les ancrs sont mobiles ($\langle M, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$). Les nuances dues aux deux autres configurations ($\langle S, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$ et $\langle M, S, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$) seront décrites par la suite.

Dans les méthodes d'AT-Family, les capteurs utilisent les informations relatives aux ancrs pour estimer leurs positions. Dans un contexte de mobilité, l'ensemble des ancrs ne peut être utilisé lorsqu'un capteur invoque le calcul de sa position. Il faut donc se restreindre aux ancrs appartenant au k -voisinage du capteur. Le k -voisinage d'un capteur contient l'ensemble des nœuds tels qu'ils se trouvent à moins de k sauts de lui. La valeur de k dépend de la mobilité des capteurs.

Dans les sections suivantes, présentant les méthodes d'ATM-Family et leurs résultats de simulations, la valeur de k est fixée à 2. Toutefois, le passage à une valeur de k supérieure est facile.

4.2.1 ATM-Free

Il s'agit ici d'expliquer l'extension de la méthode AT-Free dans un contexte de mobilité où les capteurs ne connaissent ni distances, ni angles avec leurs voisins.

Lorsqu'un capteur X souhaite calculer sa position, il lui faut les positions des ancrs se trouvant dans son 2-voisinage. Pour cela, il diffuse à son 1-voisinage un message $\langle Node_{ask} \rangle$. Les nœuds recevant ce message diffusent à leurs tours un message $\langle Anchor_{ask} \rangle$ dans le but de connaître les positions des ancrs dans leurs 1-voisinages respectifs, c'est à dire dans le 2-voisinage de X . Les ancrs recevant ce dernier message communiquent à leurs nœuds expéditeurs leurs positions. Enfin, les voisins de X envoient chacun un message communiquant les positions des ancrs dans leurs voisinages ainsi que leurs positions s'ils sont des ancrs. Au final, le capteur X obtient deux ensembles d'ancrs : le premier, noté $N_{\Delta}^1(X)$, contient les ancrs à 1 saut et le deuxième ensemble, noté $N_{\Delta}^2(X)$, contient celles distantes de 2 sauts. Ces deux ensembles sont définis tels que $N_{\Delta}^1(X) \cap N_{\Delta}^2(X) = \emptyset$. Dès la formation de ces deux ensembles, le capteur X en déduit les éléments suivants :

- Pour toute ancre a appartenant à $N_{\Delta}^1(X)$, X appartient au disque centré en a de rayon r .
- Pour toute ancre a appartenant à $N_{\Delta}^2(X)$, X n'appartient pas au disque centré en a de rayon r .

De la conjonction de ces informations, le capteur définit une zone le contenant et estimera sa position en son centre de gravité. Evidemment, si X ne contient aucune ancre dans son 2-voisinage, il ne peut estimer sa position.

Sur l'exemple de la figure 4.4, le capteur X possède deux ancrs à un saut de lui ($A, B \in N_{\Delta}^1(X)$) et une ancre à distance deux ($C \in N_{\Delta}^2(X)$). Le capteur X appartient aux disques centrés respectivement en A et B de rayon r , mais n'appartient pas à celui centré en C de rayon r . X estime alors sa position en X' .

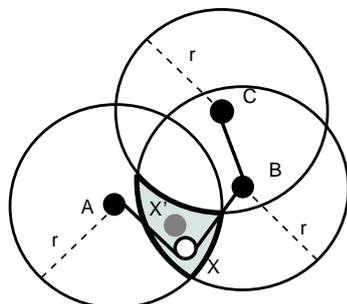


FIG. 4.4: Estimation de la position de X

4.2.2 ATM-Dist

Cette section décrit l'extension d'AT-Dist au contexte de mobilité en considérant des capteurs capables de mesurer les distances qui les séparent de leurs voisins. La première étape de cette technique d'approximation est identique à celle d'ATM-Free : lorsqu'un capteur X invoque le calcul de sa position, il définit les deux ensembles $N_{\Delta}^1(X)$ et $N_{\Delta}^2(X)$. X reçoit les positions des ancres à 1 et 2 sauts de lui, mais aussi les mesures de distance entre les voisins à 1 saut et les ancres à 2 sauts. Avec les ancres appartenant à son 1-voisinage, il mesure les distances exactes et, avec celles appartenant à son 2-voisinage, il estime les distances avec SumDist. Lorsque $|N_{\Delta}^1(X)| \geq 2$, X cherche à obtenir une position exacte :

- si $|N_{\Delta}^1(X)| \geq 3$ et sans erreur de mesure, X peut utiliser la multilatération. Autrement, il est préférable d'utiliser la règle 3 définie précédemment ;
- si $|N_{\Delta}^1(X)| = 2$ et $|N_{\Delta}^2(X)| \geq 1$ alors X cherche à appliquer les règles 1 ou 2.

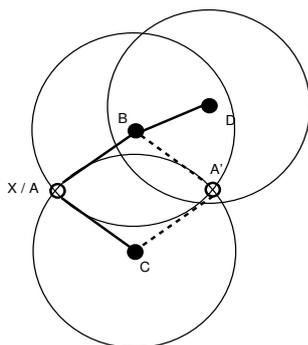


FIG. 4.5: Règle 2 où X connaît les positions de B et C

La figure 4.5 est un exemple de l'application de la règle 2 où X possède une ancre dans son 2-voisinage. L'ambiguïté de la position de X est due aux positions des ancres $B, C \in N_{\Delta}^1(X)$ et des distances entre XB et XC . Elle est résolue grâce à l'ancre C appartenant au voisinage de B .

Une position estimée sera calculée si X possède seulement une ancre dans son voisinage ($|N_{\Delta}^1(X)| = 1$) ou bien lorsque X n'obtient pas sa position exacte avec les règles 1, 2 et 3. Cette position estimée est obtenue de la façon suivante : premièrement, X appartient aux cercles centrés en les ancres appartenant à $N_{\Delta}^1(X)$ de rayons les distances entre le nœud et les ancres, mais n'appartient à aucun disque centré en les ancres de $N_{\Delta}^2(X)$ de rayons r . X calcule le centre de gravité de la zone le contenant et en déduit une estimation de sa position.

Enfin, si aucune ancre n'appartient au voisinage de X ($N_{\Delta}^1(X) = \emptyset$), alors aucune position n'est calculée.

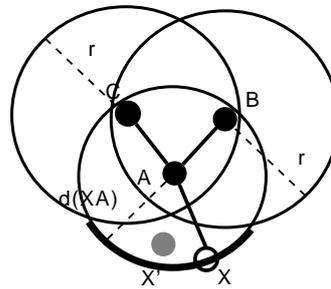


FIG. 4.6: Estimation de la position de X

La figure 4.6 est un exemple de la technique d'approximation énoncée : le capteur X appartient au cercle centré en $A \in N_{\Delta}^1(X)$ de rayon la distance d_{XA} mais n'appartient pas aux disques centrés respectivement en B et C de rayons r . Ainsi, X en déduit qu'il appartient à l'arc de cercle représenté en trait épais sur la figure. Le centre de gravité de cet arc représente une estimation de sa position.

4.2.3 ATM-Angle

Cette section décrit l'extension d'AT-Angle au contexte de mobilité où sont considérés des capteurs capables de mesurer les angles avec leurs nœuds voisins. La première étape de la technique d'approximation d'une position d'un nœud X reste identique à celle utilisée dans ATM-Free. Le capteur X définit ses deux ensembles $N_{\Delta}^1(X)$ et $N_{\Delta}^2(X)$. Les informations relatives aux angles formés entre le capteur et ses voisins à 1 saut ainsi que celles concernant les angles formés entre les voisins à 1 saut et les ancres à deux 2 sauts sont prises en compte.

Lorsque $|N_{\Delta}^1(X)| \geq 2$, X est capable de déduire sa position exacte (en utilisant la technique définie dans la section présentant AT-Angle) : en connaissant les positions et les angles formés avec au moins deux ancres voisines, il est possible de calculer une position exacte.

Quand $|N_{\Delta}^1(X)| = 1$, X calcule une estimation de sa position. Il appartient au disque

centré en l'ancre appartenant à $N_{\Delta}^1(X)$ de rayon r . En revanche, il n'appartient à aucun disque centré en une ancre de $N_{\Delta}^2(X)$ de rayon r . Ensuite, pour chacun des angles, il trace les droites correspondantes et, pour chacune d'elles, détermine son côté. En recoupant l'ensemble de ces informations, le capteur X estime sa position.

Enfin, s'il n'y a aucune ancre dans le voisinage de X ($N_{\Delta}^1(X) = \emptyset$), aucune position ne sera calculée.

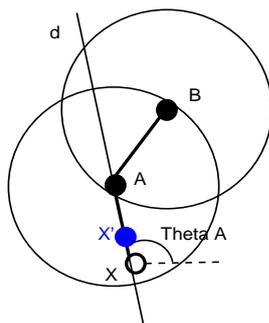


FIG. 4.7: Estimation de la position de X

La figure 4.7 est un exemple d'approximation de la position de X . Dans cet exemple, X utilise les informations des ancres $A \in N_{\Delta}^1(X)$ et $B \in N_{\Delta}^2(X)$. X appartient au disque de centre A de rayon r mais n'appartient pas à celui centré en B de rayon r . X connaît l'angle θ_A qu'il forme avec A et déduit qu'il appartient à la droite passant par A d'inclinaison θ_A . De ces informations, on obtient deux points d'intersection : le premier est défini entre la droite et le cercle centré en A et le deuxième entre la droite et le cercle de centre B . Ces deux points d'intersection définissent un segment contenant X et son milieu X' correspond à l'estimation de la position de X .

4.2.4 Propriétés et implémentation

Les extensions proposées ci-avant conservent les deux propriétés importantes des méthodes d'AT-Family. L'implémentation doit en revanche être adaptée à ces extensions.

Les deux propriétés des méthodes d'AT-Family sont rappelées ci-dessous :

- un capteur peut éliminer des informations si elles ne sont pas cohérentes avec sa zone ;
- un capteur sait si sa position estimée est proche de sa position réelle grâce à sa borne d'erreur de position (ϵ) qu'il calcule.

Cette deuxième propriété, qui donne une indication sur la précision des positions calculées, sera utilisée lors de l'ordonnancement des dates de calcul des positions.

Concernant l'implémentation, elle doit s'adapter aux extensions. Dans les méthodes

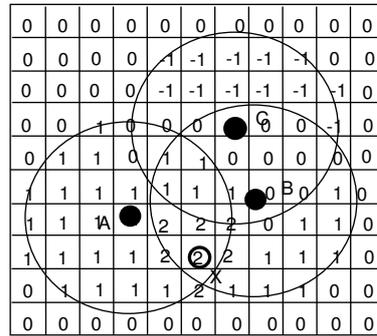


FIG. 4.8: Discretisation du réseau

d'AT-Family, le réseau entier est représenté par une matrice. Dans le contexte de mobilité, un capteur n'utilise que les informations des ancres appartenant à son k -voisinage ; par conséquent, la matrice ne doit représenter qu'une partie du réseau dont l'aire est égale à $[2(k+1)r]^2$. Ensuite, le principe reste identique. En prenant l'exemple d'ATM-Free représenté sur la figure 4.8, lorsque X estime sa position avec les ancres $A, B \in N_{\Delta}^1(X)$ et $C \in N_{\Delta}^2(X)$, il incrémente de 1 les cases appartenant aux disques centrés en A et B de rayons r et décrémente de 1 celles appartenant au disque de centre C de rayon r . Le centre de gravité de la zone constituée des cases de valeur maximale représente une estimation de la position de X .

4.2.5 Adaptation des stratégies d'ordonnement

Les stratégies d'ordonnement décrites précédemment considèrent des capteurs capables de calculer leurs positions exactes dans un contexte où tous les capteurs sont mobiles. Les méthodes de localisation présentées ci-dessus sont applicables quelle que soit la mobilité des capteurs ou des ancres et fournissent des informations sur la précision des positions calculées. Afin d'intégrer ces données, les stratégies SFR, DVM et MADRD doivent être adaptées.

Parmi les différentes formes de mobilité, celle où les ancres sont mobiles mais les capteurs non ($\langle S, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$) est particulière. En effet, dans cette configuration, les stratégies DVM et MADRD, qui ordonnent les dates de calcul des positions en prenant en compte la mobilité des nœuds, n'ont aucun sens. La stratégie la plus adaptée à cette configuration est SFR. Dans cette stratégie d'ordonnement, la période séparant deux calculs de position est fixe. Ainsi, un capteur invoquera le calcul de sa position à chaque date définie jusqu'à obtenir une position jugée précise (lorsque la valeur de ϵ est petite).

Dans les deux autres formes de mobilité ($\langle M, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$ et $\langle M, S, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$), les capteurs sont mobiles. Par conséquent, les trois stratégies peuvent être appliquées mais doivent être adaptées afin de prendre en compte la précision des positions. La stratégie SFR est la seule n'ayant pas besoin d'être modifiée. Elle ne considère pas la mobilité des capteurs puisque la période est fixe et peut donc être utilisée

en l'état. En revanche, il n'en est pas de même pour DVM et MADRD puisque dans ces deux stratégies, l'ordonnancement des dates se fait en fonction de la mobilité des capteurs. Or, les informations relatives à la mobilité (vitesse et trajectoire) dépendent de la précision des positions (leurs ϵ). Ainsi, si ces stratégies d'ordonnancement s'appuient sur des positions exactes ($\epsilon = 0$), alors DMV et MADRD n'ont besoin d'aucune modification. Par contre, dès qu'un capteur calcule sa position avec une borne d'erreur élevée, la période séparant le prochain calcul de sa position doit être raccourcie. En conclusion, la période définie doit prendre en compte la mobilité mais aussi la précision de la position du capteur : plus un capteur a une position précise (resp. grossière), plus la période entre deux calculs de sa position est élevée (resp. faible).

Soit t la date retournée par une des méthodes DVM ou MADRD et t' celle prenant en compte la précision ϵ de la position d'un capteur. La date t' pour les méthodes d'ATM-Family est calculée comme suit :

$$t' = \begin{cases} t & , \text{ si } \epsilon = 0 \\ 0 & , \text{ si } \epsilon > r \\ t' = t - \frac{\epsilon}{r}t & , \text{ autrement} \end{cases}$$

Lorsque $\epsilon = 0$, la position obtenue par le capteur est exacte et par conséquent la période retournée par DVM ou MADRD est utilisée. Lorsque $\epsilon > r$, la position du capteur est jugée très mauvaise et le capteur doit invoquer le calcul de sa position immédiatement (la précision d'une position se juge par rapport au rayon d'émission r des capteurs). Lorsque $0 < \epsilon \leq r$, la période retournée par DVM ou MADRD est diminuée de manière linéaire en fonction de la précision de la position du capteur.

Les simulations de la section suivante montrent que, malgré cette adaptation de l'ordonnancement des dates de calcul, la stratégie MADRD reste perturbée par les erreurs de position. Alors que DVM utilise uniquement la vitesse pour ordonnancer les temps de calcul des positions, MADRD considère également la trajectoire du capteur. La prédiction des positions du capteur se base sur cette trajectoire et sera utilisée durant le déplacement du capteur pour qu'il puisse obtenir à tout moment sa position. Or, en considérant des positions estimées, la prédiction peut s'avérer totalement fautive et engendrer de grosses erreurs de position. Ce phénomène est étudié dans la section suivante.

4.3 Simulations

Cette section étudie les performances des méthodes ATM-Free, ATM-Dist et ATM-Angle en considérant les trois configurations de mobilité. Ces méthodes sont analysées selon la stratégie d'ordonnancement utilisée (SFR, DVM et MADRD). Lorsque les capteurs sont statiques et les ancres mobiles, seule la stratégie SFR sera considérée.

4.3.1 Environnement des simulations

Les simulations s'appuient sur le modèle de mobilité Random WayPoint (RWP) décrit dans (Camp et al., 2002). Il s'agit du modèle usuellement utilisé pour des études dans les réseaux mobiles. Dans ce modèle, les vitesses des nœuds varient et un nœud peut stopper son déplacement. Chaque nœud choisit aléatoirement une destination et se déplace vers elle. Dès qu'un nœud atteint sa destination, il en choisit aléatoirement une nouvelle, ... L'outil BonnMotion décrit dans (BonnMotion, 2002) est un générateur de scénarios de mobilité utilisant le modèle RWP. Cet outil est utilisé dans les simulations qui vont suivre. Chaque scénario dure 90 secondes durant lesquelles les vitesses et trajectoires des capteurs varient.

Dans ces simulations, tous les messages arrivent à destination. Chaque scénario de simulation considère une topologie de 120 capteurs distribués uniformément dans une aire de 300×300 . Le rayon de transmission des capteurs est fixé à 20. Parmi ces 120 nœuds, certains sont sélectionnés aléatoirement pour être des ancres. Le nombre d'ancres α est choisi tel que $\alpha \in \{20, 40, 60, 80, 100\}$ ce qui représente une densité en ancres variant de 0.28 à 1.41. Les erreurs de mesure sont normalisées par rapport à r pour les mesures de distance et par rapport à π pour les mesures d'angle. Ainsi, les études qui vont suivre considèrent un pourcentage d'erreurs de mesure δ égal à 0, 5 et 10%.

Lors de l'exécution d'un scénario, il est possible qu'un capteur n'obtienne pas sa localisation lorsqu'il invoque le calcul de sa position. Ce cas se produit lorsqu'aucune ancre n'est présente dans son k -voisinage; la fréquence d'apparition de cette situation dépend de la densité en ancres du réseau. Par conséquent, au lieu de s'intéresser au taux de l'erreur moyenne, il est plus subtile de se focaliser sur le temps durant lequel un capteur est localisé avec une erreur de position inférieure à 50%. Au delà de cette limite, le capteur est considéré comme étant mal localisé. Ce critère d'étude reste valable quelle que soit la densité du réseau. En revanche, dans la configuration $\langle S, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$, il n'a plus de sens puisque les capteurs sont statiques. C'est donc le temps moyen nécessaire aux capteurs pour obtenir des positions avec des bornes d'erreurs inférieures à 50% qui sera étudié dans cette configuration.

Les analyses se basent sur des échantillons de 1000 exécutions. L'écart type obtenu est faible et les graphes représentent les intervalles de confiance de chaque point tel qu'il y ait 95% de chances que la valeur réelle du point appartienne à cet intervalle.

4.3.2 Résultats

Pour chacune des configurations de mobilité, les méthodes de localisation d'ATM-Family sont étudiées selon les stratégies d'ordonnancement SFR, DVM et MADRD, excepté pour la configuration où les capteurs sont statiques et les ancres mobiles où seule SFR est considérée. Les premiers résultats présentés sont ceux de la configuration $\langle M, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$, puis suivent ceux de la configuration $\langle M, S, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$.

Enfin, la dernière configuration $\langle S, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$ sera étudiée. Chaque configuration est analysée en considérant un pourcentage d'erreurs de mesure égal à 0 puis 5%.

Nœuds et ancrs mobiles

Dans un premier temps, les scénarios considèrent des erreurs de mesure nulles. Les résultats obtenus sont présentés dans la première colonne de la figure 4.9abc. Les performances des méthodes ATM-Free, ATM-Dist et ATM-Angle sont respectivement représentées sur les graphes 4.9a, 4.9b, 4.9c. Chaque graphe contient trois courbes correspondant aux trois stratégies d'ordonnancement SFR, DVM et MADRD. Ces courbes portent les noms x_0 (resp. x_{dist} , x_{angle}) pour les configurations $\langle M, M, \emptyset \rangle$ (resp. $\langle M, M, dist \rangle$, $\langle M, M, angle \rangle$), avec x étant soit SFR, soit DVM, soit MADRD.

Au regard des résultats reportés sur le graphe 4.9a, en utilisant la méthode ATM-Free, les capteurs n'arrivent pas à obtenir leurs positions précises (avec une erreur de position inférieure à 50%) plus du tiers du temps de l'exécution d'un scénario. Ce constat est valable quelle que soit la stratégie d'ordonnancement utilisée. L'augmentation de la densité en ancrs améliore les performances d'ATM-Free mais cette solution n'est pas envisageable : des performances correctes imposent une densité en ancrs beaucoup trop importante. Ces résultats sont dus au fait qu'ATM-Free calcule uniquement des positions estimées. Or, en utilisant seulement le 2-voisinage ($k = 2$) des capteurs, ces derniers n'obtiennent pas un nombre d'informations suffisant pour garantir des positions précises. Pour corriger ce défaut, il est possible d'augmenter la densité en ancrs ou bien la valeur de k au détriment de la consommation d'énergie.

En revanche, le constat est tout autre lorsque les capteurs ont la capacité de mesurer les distances ou les angles avec leurs voisins. En effet, dans le graphe 4.9b où les capteurs utilisent ATM-Dist, les performances sont nettement améliorées. Les capteurs se localisent avec précision durant plus de 60% du temps d'exécution d'une simulation avec respectivement 60 (pour MADRD) et 70 (pour DVM) ancrs dans le réseau. Ces résultats atteignent même, avec 100 ancrs dans le réseau pour DVM et MADRD, une durée de localisation précise représentant environ 75% du temps alors que la stratégie SFR obtient des résultats nettement moindre. Avec ATM-Dist, si l'écart entre les résultats obtenus par DVM et MADRD reste faible, les performances de SFR restent loin de ces deux stratégies. Ceci confirme l'intérêt d'utiliser les informations liées à la mobilité.

Avec la méthode ATM-Angle, les capteurs ont la capacité de mesurer les angles avec leurs voisins. Les stratégies DVM et SFR fournissent approximativement les mêmes résultats que précédemment alors que la stratégie MADRD les améliore. En effet, avec 60 ancrs dans le réseau, les capteurs sont bien localisés durant 48%, 63% et 82% du temps d'exécution d'un scénario en utilisant respectivement SFR, DVM et MADRD. Toutefois, l'écart entre les courbes des stratégies DVM et MADRD se réduit au fur et à mesure que la densité en ancrs augmente.

Les graphes 4.9def correspondent aux performances obtenues par les méthodes d'ATM-Family en considérant un pourcentage de 5% d'erreurs de mesure. Le graphe

4.9d représente les performances de ATM-Free qui est une méthode libre de mesure et donc, par définition, insensible aux erreurs de mesure. Par conséquent, les résultats obtenus sont les mêmes que ceux représentés dans le graphe 4.9a. Par contre, pour les méthodes ATM-Dist et ATM-Angle, l'ampleur de l'impact de ces erreurs de mesure varie selon la stratégie d'ordonnancement utilisée. En comparant ces résultats à ceux obtenus avec un pourcentage d'erreurs de mesure nul, les performances de la méthode ATM-Dist, représentées sur le graphe 4.9e, ne diminuent que très légèrement avec les stratégies SFR et DVM tandis qu'elles chutent considérablement avec la stratégie MADRD. Pour expliquer le premier constat, il faut rappeler que les capteurs utilisent les informations de leurs 2-voisinages. Par conséquent, l'accumulation des erreurs n'est pas significative. En revanche, en utilisant une valeur de k plus élevée, cette accumulation augmenterait et les performances s'en trouveraient dégradées. Concernant la courbe obtenue avec la stratégie MADRD, cette chute de performances s'explique par l'impact inévitable des erreurs de mesure sur les prédictions. En effet, MADRD s'appuie sur les deux dernières positions calculées pour un capteur. Or, la précision de la prédiction du mouvement d'un capteur dépend de la précision de ces deux positions. Dès lors que des erreurs de mesure sont introduites, seule une estimation des positions est fournie au capteur impliquant dans le même temps des erreurs dans sa prochaine prédiction. Le même phénomène sur la courbe de MADRD est observé pour la méthode AT-Free puisqu'elle attribue uniquement des positions estimées aux capteurs.

Dans le graphe 4.9f, représentant les performances d'ATM-Angle, l'impact des 5% d'erreurs de mesure est visible quelle que soit la stratégie utilisée mais à des degrés différents. Ainsi, les résultats obtenus avec MADRD subissent une baisse considérable tandis que DVM, malgré une chute, se maintient à un niveau plus que satisfaisant. Cet effondrement des résultats s'explique pour les mêmes raisons que pour la méthode AT-Dist et est plus marqué car les erreurs d'angle impliquent des erreurs de position plus importantes que celles dues aux distances.

Finalement, pour chacune des méthodes d'ATM-Family, il est possible de classer les différentes stratégies d'ordonnancement en considérant la présence ou non d'erreurs de mesure. Le tableau 4.1 donne ces classements (où le rang 1 est le meilleur).

rang	ATM-Free		ATM-Dist		ATM-Angle	
	0%	5%	0%	5%	0%	5%
1	DVM		MADRD	DVM	MADRD	DVM
2	SFR		DVM	MADRD	DVM	SFR
3	MADRD		SFR	SFR	SFR	MADRD

TAB. 4.1: Classement des stratégies d'ordonnancement avec ou sans erreur de mesure pour chacune des méthodes d'ATM-Family

Les auteurs de (Tilak et al., 2005) considèrent un environnement de mobilité identique à celui présenté ici : tous les noeuds sont mobiles. Par opposition à ce qui vient d'être décrit dans cette partie, les capteurs ont tous la possibilité de calculer leurs po-

sitions exactes. Au final, les auteurs font la conclusion suivante : la stratégie MADRD est considérée comme étant la meilleure devant, dans l'ordre, les stratégies DVM puis SFR. En se reportant au tableau 4.1, ce même classement est valable pour ATM-Dist et ATM-Angle sans erreur de position. Cela semble logique puisque ces deux méthodes ont la capacité de déterminer les positions des capteurs de façon exacte et se rapprochent ainsi de la configuration de l'étude faite dans (Tilak et al., 2005). En revanche, dès lors que des erreurs de mesure sont introduites ou plus généralement lorsque les stratégies s'appuient sur des positions estimées, le classement est tout autre : ainsi, la stratégie DVM semble être la plus à même de garantir une bonne durée de localisation malgré des erreurs de position. Par conséquent, la conclusion faite par les auteurs ne peut s'étendre quel que soit l'environnement du réseau. La meilleure stratégie sera donc MADRD sans erreur de position, et DVM sinon.

Nœuds mobiles et ancres statiques

Cette section s'intéresse à la configuration où seuls les nœuds sont mobiles et les ancres sont statiques. En reprenant la notation précédente, les courbes en figure 4.10, portant les noms x_0 , x_{dist} et x_{angle} , représentent respectivement les configurations $\langle M, S, \emptyset \rangle$, $\langle M, S, dist \rangle$ et $\langle M, S, angle \rangle$ (x étant soit SFR, soit DVM, soit MADRD). L'analyse de cette configuration de mobilité met en évidence l'influence de la mobilité des ancres.

En effet, en comparant les résultats de simulations des configurations $\langle M, S, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$ (figure 4.10) à ceux des configurations $\langle M, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$ (figure 4.9), il apparaît clairement que la mobilité des ancres ne contribue guère plus à la localisation des capteurs. Par conséquent, l'analyse des performances est similaire à celle faite précédemment.

Mais pourquoi ces résultats sont-ils si proches ? Quelle que soit la mobilité des nœuds ou des ancres (exceptée la configuration où les nœuds sont statiques et les ancres mobiles), il est clair que les performances des techniques de localisation dépendent de la densité en ancres dans le réseau. Or, cette densité est-elle la même que les ancres soient statiques ou mobiles ? Pour répondre à cette question, il faut considérer le modèle de mobilité utilisé. Ici, il s'agit du Random WayPoint qui définit un déplacement uniforme des capteurs. Par conséquent, la densité en ancres reste la même avec ou sans mobilité, expliquant de ce fait les résultats obtenus. Les modèles de mobilité sont nombreux et souvent spécifiques à une application donnée : déplacement militaire, migration d'animaux, véhicules routiers, ... Une étude impliquant l'ensemble des modèles de mobilité n'étant pas envisageable, le modèle Random WayPoint est un indicateur des performances des méthodes étudiées mais ne garantit pas le bon fonctionnement des méthodes sur tous les modèles de mobilité.

Nœuds statiques et ancres mobiles

Pour l'étude de la dernière configuration où les ancres sont mobiles mais les nœuds statiques ($\langle S, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$), le critère d'analyse change. Etant donné que les capteurs sont statiques, le critère devient le temps moyen nécessaire aux capteurs pour obtenir leurs positions avec des bornes d'erreurs inférieures à 50%. Les courbes des graphes de la figure 4.11 (SFR_0 , SFR_{dist} , SFR_{angle}) correspondent aux configurations $\langle S, M, \emptyset \rangle$, $\langle S, M, dist \rangle$ et $\langle S, M, angle \rangle$. Le graphe 4.11a représente les performances des méthodes sans erreur de mesure et celui en 4.11b considère un pourcentage d'erreurs de mesure égal à 5%.

Sans capacité de mesure, les capteurs mettent plus de temps avant d'obtenir une position précise (une borne d'erreur de position inférieure à 50%). Par exemple, avec 40 ancres dans le réseau (soit une densité en ancre égale à 0,56), le temps moyen mis par un capteur pour obtenir une borne d'erreur inférieure à 50% est de 30 secondes soit un tiers du temps du déroulement du scénario. Plus la densité en ancres augmente, plus le temps moyen nécessaire est court.

Dès lors que les capteurs ont la capacité de mesurer les distances ou les angles avec leurs nœuds voisins, le temps moyen nécessaire pour qu'ils obtiennent des positions précises est considérablement réduit. Plus la densité en ancres augmente, plus cette durée tend vers 0 ; ce qui est normal puisqu'un capteur n'a besoin que de deux ou trois ancres voisines pour se localiser selon qu'il ait la capacité de mesurer des angles ou des distances pour obtenir sa position.

Toutefois, l'introduction des erreurs de mesure marque une différence entre les méthodes ATM-Dist et ATM-Angle. En effet, comme cela a pu être évoqué précédemment, les erreurs de mesure sont plus importantes lorsqu'il s'agit de mesures d'angle. Par conséquent, il n'est pas étonnant de constater une dégradation des performances de la méthode ATM-Angle (tout en maintenant des temps moyens satisfaisants), tandis que ATM-Dist reste stable.

Dans l'ensemble des simulations réalisées, les remarques faites lors de l'introduction de 5% d'erreurs de mesure se confirment avec un pourcentage égal à 10.

4.4 Conclusion

Le problème de la localisation dans les réseaux de capteurs statiques étant toujours ouvert, peu de chercheurs se sont intéressés à ce problème dans les réseaux mobiles. Les méthodes de localisation proposées reprennent et adaptent celles présentées dans le chapitre précédent. Par conséquent, elles en récupèrent les points forts et les défauts. S'ajoute ensuite le problème suivant : de par la contrainte énergétique, un capteur ne peut calculer sa position de façon continue. La stratégie d'ordonnement des dates auxquelles un capteur calcule sa position doit économiser de l'énergie tout en maintenant un niveau de précision des positions satisfaisant. Ce chapitre a permis de remettre

en cause et enrichir certaines des stratégies existantes tout en indiquant, selon l'environnement du réseau, lesquelles étaient les plus adaptées.

Il s'agit d'un premier travail sur le problème de la localisation dans les réseaux de capteurs mobiles qui pourra faire l'objet d'améliorations sur l'estimation des positions ou bien sur les stratégies d'ordonnancement.

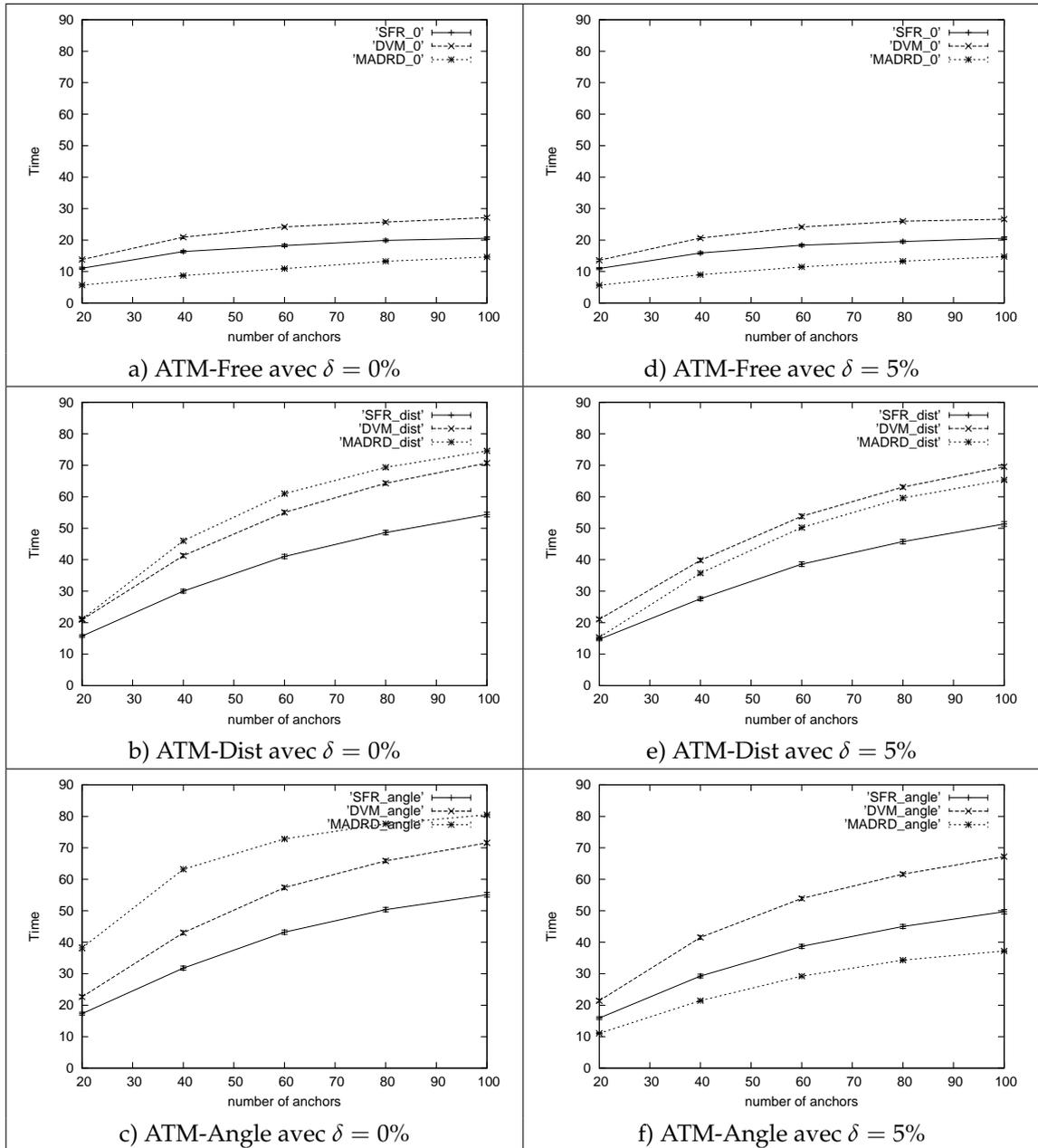


FIG. 4.9: Performances de SFR, DVM et MADRD dans les configurations $\langle M, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$ sans erreur de mesure (a,b,c) et avec 5% d'erreurs de mesure (d,e,f) pour chacune des méthodes d'ATM-Family

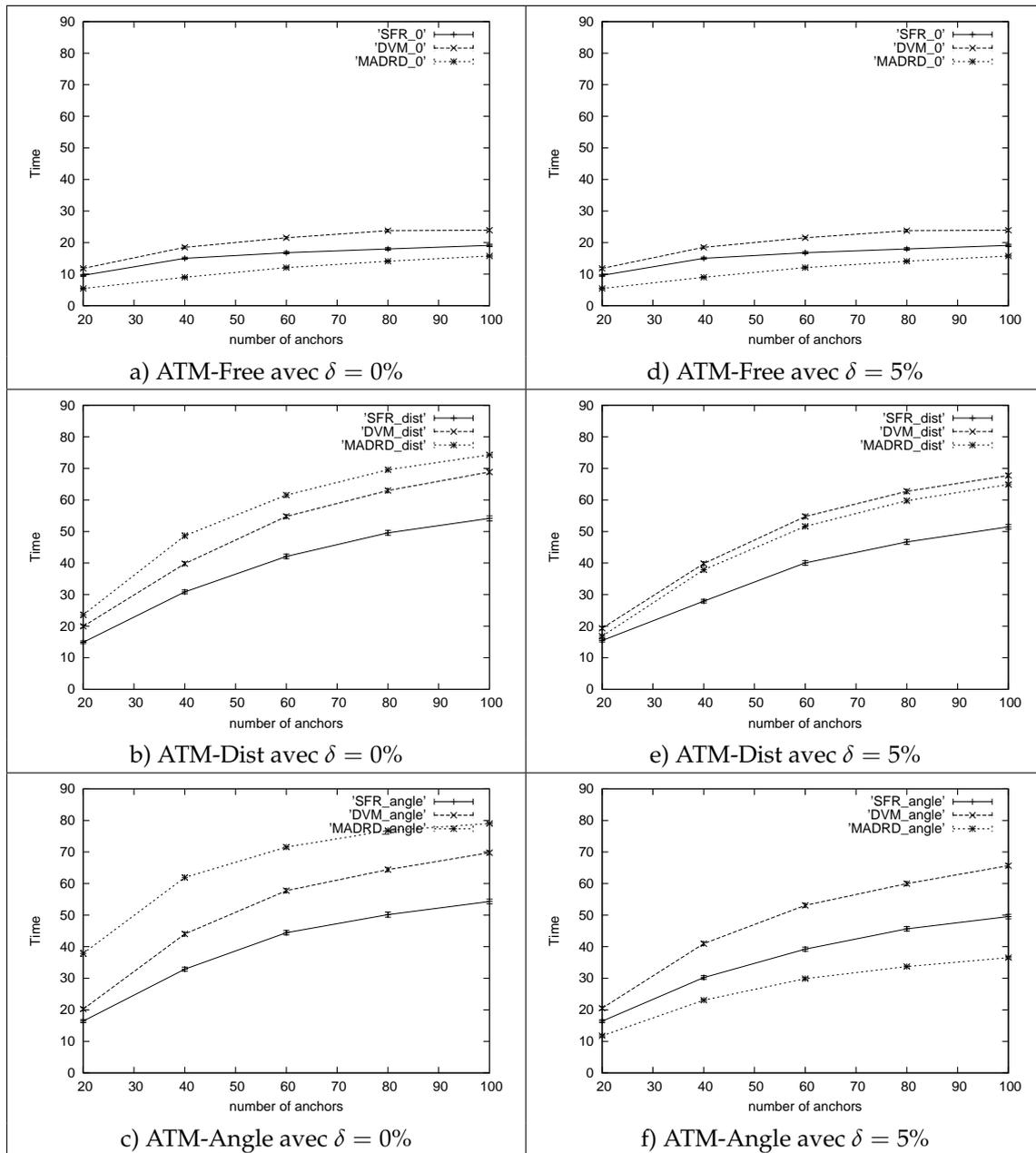


FIG. 4.10: Performances de SFR, DVM et MADRD dans les configurations $\langle M, S, \{\emptyset, \text{dist}, \text{angle}\} \rangle$ sans erreur de mesure (a,b,c) et avec 5% d'erreurs de mesure (d,e,f) pour chacune des méthodes d'ATM-Family

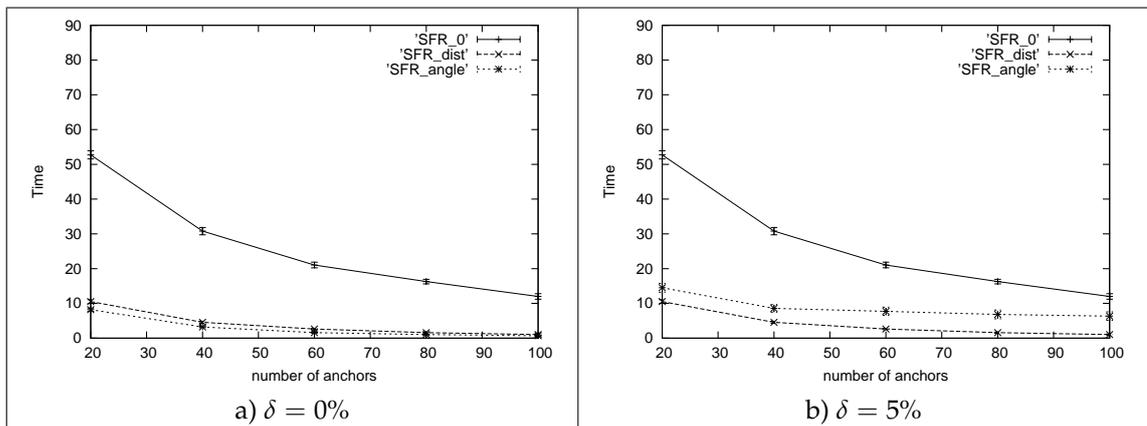


FIG. 4.11: Performances de SFR dans les configurations $\langle S, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$ sans erreur de mesure (a) et avec 5% d'erreurs de mesure (b) pour chacune des méthodes d'ATM-Family

Deuxième partie

Le routage dans les réseaux de capteurs

Cette partie traite du problème du routage dans les réseaux de capteurs. Plusieurs solutions ont été proposées, notamment celles utilisant les positions des capteurs : il s'agit du routage géographique. Cependant, la plupart de ces solutions suppose que les positions des capteurs sont exactes. Or, dans la pratique, il est difficile d'attribuer des positions exactes à tous les capteurs et les erreurs de position peuvent même être conséquentes. Deux techniques de routage nommées EEG-Routing et Ellipse-Routing, définies respectivement pour les réseaux de capteurs statiques ou mobiles, sont proposées dans cette thèse. Chacune se distingue des méthodes existantes en se basant sur les positions exactes ou estimées des capteurs ainsi que sur leurs bornes d'erreurs de position. Par conséquent, ces techniques de routage sont compatibles avec les méthodes de localisation décrites précédemment.

Dans la méthode EEG-Routing, du fait de l'incertitude sur les positions, l'existence d'un lien de communication entre deux capteurs ne sera connue qu'à une certaine probabilité près. En fonction de ces probabilités et du modèle énergétique utilisé, les capteurs sélectionneront les voisins relais du message. Au fur et à mesure des avancées des messages, les capteurs impliqués corrigeront leurs informations basées sur des probabilités, améliorant ainsi les données sur lesquelles la stratégie de routage s'appuie.

La mobilité des capteurs entraîne une modification continue des liens de communication. C'est pourquoi, dans la méthode Ellipse-Routing, les capteurs n'ont besoin d'aucune information relative à leurs voisins. Lorsqu'un capteur souhaite expédier un message, il le diffuse à l'intérieur d'une région géographique pour atteindre le destinataire. Chaque capteur receveur du message doit ensuite vérifier son appartenance à cette région et, le cas échéant, devient relais du message. Cette méthode est d'abord définie en considérant des positions exactes puis ensuite estimées.

Grâce à des stratégies de transmission économes en énergie définie en fonction du modèle énergétique utilisé, ces solutions se révèlent très efficaces en termes de consommation d'énergie tout en garantissant un taux d'acheminement des messages très élevé.

Chapitre 5

Présentation générale

Le rôle propre d'un capteur est de détecter un événement et d'en avertir une station de base. Les chapitres précédents se sont efforcés de donner de la pertinence aux événements perçus par les capteurs en joignant à leurs annonces des informations relatives à leurs localisations.

Vient alors le problème de l'acheminement du message émis par un capteur à destination de la station de base. En effet, si un capteur n'atteint pas dans sa portée d'émission la station de base, il doit alors effectuer un routage dit *multi-sauts*. En d'autres termes, chaque capteur intermédiaire fera suivre le message jusqu'à atteindre la destination (la station de base). La figure 5.1 illustre ce schéma de routage vers la station de base lorsqu'un capteur détecte un événement.

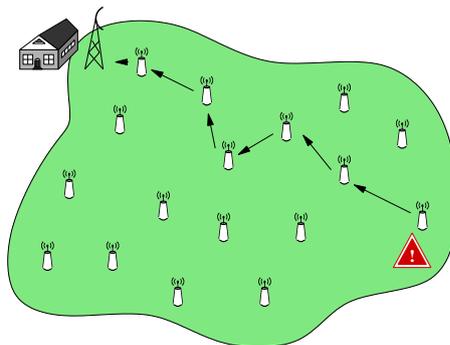


FIG. 5.1: Transmission d'un message vers la station de base lors de la détection d'un événement

Dans les réseaux de capteurs, les algorithmes de routage doivent garantir un fort taux d'acheminement des messages vers la station de base tout en limitant la consommation d'énergie. La résolution de ce problème d'optimisation bi-critères nécessite la gestion de certaines contraintes qui sont, pour la plupart, répertoriées dans (Akyildiz et al., 2002) et dont les principales sont les suivantes :

- *Le passage à l'échelle* : comme pour le problème de la localisation, les algorithmes

de routage doivent assurer leur bon fonctionnement quel que soit le nombre de capteurs dans le réseau.

- *La qualité de service* : chaque message émis doit arriver à destination dans son intégralité. De plus, selon l'application, la durée d'acheminement d'un message a son importance : un message arrivant après un certain délai pourrait être considéré comme obsolète et serait alors inutilisable. De plus, le type de données transmises exigera un débit plus ou moins élevé.
- *La tolérance aux pannes* : au cours du temps, des nœuds peuvent être dans l'incapacité de communiquer et donc de coopérer. Cela peut être dû à des pannes de batterie, des modules de communication ou bien des pannes d'autres natures ... Malgré ces perturbations, le fonctionnement du processus de routage ne doit pas être altéré. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place un mécanisme de gestion des pannes.
- *Le déploiement des capteurs* : il peut se faire de façon déterministe ou aléatoire. Dans la première configuration, les algorithmes peuvent définir à l'avance les chemins que devront emprunter les messages alors que dans le second, c'est le comportement de chaque capteur, selon ses propres connaissances, qui conduira à l'émergence globale du processus de communication.
- *La dynamique du réseau* : dans certains cas, les capteurs sont mobiles ce qui rend le routage plus complexe. En effet, de par la dynamique des nœuds, des liens de communication apparaissent et disparaissent. Toutefois, les réseaux statiques ne sont pas épargnés par ce phénomène puisque les capteurs peuvent subir de légers déplacements (par exemple, dus aux conditions climatiques, ...).
- *Le modèle d'émission des données* : il existe plusieurs types de communication entre un capteur et une station de base. Selon l'application, un capteur peut être amené à envoyer régulièrement à la station de base des informations relatives à son environnement. Quelquefois, c'est la station de base qui émet une requête à un capteur et reçoit en retour une réponse. Enfin, un capteur peut envoyer un message à la station de base dès lors qu'il perçoit un événement dans sa zone de surveillance. Ces modes de communication entre les nœuds et la station de base impliqueront des protocoles de routage totalement distincts.

La problématique du routage dans les réseaux ad hoc n'est pas nouvelle et des protocoles de routage aujourd'hui reconnus comme OLSR (Optimized Link State Routing protocol (Clausen et Jacquet, 2003)) ou AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV) (Perkins et al., 2003)) ont fait la preuve de leur efficacité. Bien que les réseaux de capteurs appartiennent à la famille des réseaux ad hoc, ces protocoles ne peuvent s'appliquer à ce type de réseaux. La contrainte d'énergie, la limitation de mémoire et la faible capacité de calculs empêchent leurs utilisations. Il est donc nécessaire de trouver des algorithmes de routage spécifiques aux réseaux de capteurs. Pour cela, des méthodes basées sur la localisation des capteurs ont été proposées et se regroupent selon deux catégories : celles s'appuyant sur des systèmes de coordonnées virtuelles et celles se basant sur les positions géographiques des capteurs (il s'agit du *routage géographique*).

Dans la première catégorie, le système de coordonnées est construit spécifiquement pour le routage. Les méthodes (Chen et al., 2006; Rossi et al., 2005; Elhafsi et al., 2007) en sont des exemples. En revanche, dans la seconde catégorie, il s'agit d'applications qui requièrent la connaissance des positions des capteurs pour router les messages. C'est dans cette catégorie que s'inscrit la suite de cette thèse.

En se basant sur les positions des capteurs et celle de la station de base, les algorithmes de routage géographique sélectionneront le meilleur chemin pour acheminer les messages. Ces méthodes font toutes une supposition forte quant à la localisation des capteurs puisqu'elles font l'hypothèse que leurs positions exactes sont connues. Or, ceci ne peut se concrétiser que dans deux configurations. Dans la première, les positions sont attribuées par des modules de localisation (par exemple le GPS, Galileo,...) après un déploiement aléatoire; ceci n'est pas raisonnable étant donné les coûts que cela engendrerait, particulièrement pour ces méthodes qui se disent souvent plus efficaces dans des réseaux denses en capteurs. Dans la seconde configuration, les capteurs sont déployés via une intervention humaine ou autre. Dans ce cas, la topologie du réseau est connue à l'avance et les capteurs sont configurés en amont pour garantir un routage optimal. Seules des positions attribuées par des techniques de localisation, comme par exemple celles décrites dans les premiers chapitres, pourraient être utilisées à condition qu'elles soient exactes. Or, il a été montré que le calcul de positions exactes ne peut s'obtenir que dans certaines conditions spécifiques. Tout d'abord, les méthodes de localisation doivent être basées sur des mesures. Ensuite, les mesures de distances ou d'angles ne doivent pas être perturbées par des erreurs et enfin le pourcentage en ancre doit être suffisamment élevé.

Partant de ce constat, les travaux qui sont présentés dans les deux chapitres suivants proposent des algorithmes de routage géographique, pour les réseaux de capteurs statiques et mobiles, qui se basent sur les positions exactes ou estimées des capteurs ainsi que sur leurs bornes d'erreurs de position. Les méthodes de routage géographique dans les réseaux statiques se disent robustes à de faibles erreurs de position du GPS par exemple (une erreur inférieure à 3%), tandis que celles proposées pour les réseaux de capteurs mobiles ne tolèrent aucune erreur de position. Les algorithmes présentés par la suite considèrent des erreurs de position non bornées. C'est en cela que ces nouvelles méthodes tirent leur originalité et crédibilisent le routage géographique dans les réseaux de capteurs.

Préalablement, les sections suivantes rappellent le fonctionnement des méthodes marquantes du routage géographique dans les réseaux de capteurs statiques, puis dans les réseaux de capteurs mobiles.

5.1 Le routage géographique dans les réseaux statiques

Les algorithmes de routage présentés dans cette section sont tous multi-sauts. Certains ne sont pas les plus récents dans la thématique mais sont sans nul doute ceux qui

sont à la base des études réalisées de nos jours. Ces algorithmes se révèlent plus ou moins efficaces concernant le taux d'acheminement des messages et la consommation d'énergie.

5.1.1 Les algorithmes Greedy

Les algorithmes de routage dits *greedy* (avides) basent leur raisonnement sur la trajectoire à vol d'oiseau entre une source et une destination. Le but est alors d'acheminer les messages de sorte que leurs parcours soient les plus proches de cette trajectoire.

MFR (Most Forward within Radius)

La stratégie de routage définie par la méthode *MFR* (Most Forward within Radius), décrite dans (Takagi et Kleinrock, 1984; Hou et Li, 1986), suppose que chaque nœud connaît sa position, celles de ses voisins et enfin, celle de la destination. Lorsqu'un capteur doit envoyer un message à une destination non voisine, il sélectionne parmi ses voisins celui qui fera suivre le message selon le principe suivant : le nœud commence par tracer une droite entre lui et la destination. Ensuite, il trace les projetés orthogonaux des positions des capteurs voisins sur la droite. Celui dont le projeté orthogonal est le plus proche de la destination sera sélectionné pour faire suivre le message et appliquera à son tour cette sélection jusqu'à atteindre la destination. Par exemple, dans la figure 5.2, le nœud S cherche à envoyer un message à la destination D . Il sélectionne parmi ses voisins v_1 et v_2 celui qui fera suivre le message, en l'occurrence v_1 puisque $d'_1 < d'_2$.

Greedy Routing

Dans la méthode *greedy routing* (Finn, 1987), les capteurs connaissent les positions de leurs voisins ainsi que celle de la destination. Elle se différencie de la méthode *MFR* dans sa stratégie de sélection du voisin devant faire suivre le message. Cette stratégie est la plus intuitive pour le routage géographique : elle consiste à sélectionner le voisin qui est le plus proche en distance euclidienne de la destination. Ce procédé est répété jusqu'à ce que la destination soit atteinte. Pour reprendre l'exemple en figure 5.2, le nœud S sélectionnera le capteur v_1 puisque $d_1 < d_2$.

Compass Routing

L'idée générale de la méthode *Compass routing* (Kranakis et al., 1999) diffère de celle des deux méthodes précédentes où le message est transféré au voisin qui se rapproche le plus de la destination. Dans la méthode *Compass Routing*, la stratégie de routage consiste à faire suivre le message au voisin qui minimise l'angle formé par lui-même, l'expéditeur et la destination. En d'autres termes, il s'agit de sélectionner le voisin dont la direction est la plus proche de celle de la destination. Dans l'exemple de la figure

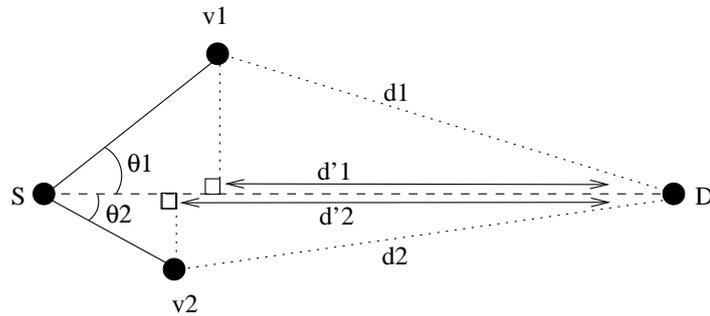


FIG. 5.2: Stratégie de routage pour les méthodes MFR, Greedy Routing et Compass routing

5.2, le nœud S choisira le voisin v_2 pour faire suivre son message à destination de D , puisque $\theta_2 < \theta_1$. Ce processus se répète pour chaque nœud intermédiaire jusqu'à atteindre la destination.

Conclusions

Plusieurs remarques doivent être faites pour ces méthodes. La première concerne la configuration du réseau : l'efficacité de ces méthodes, en terme de taux d'acheminement des messages, est liée à la densité en nœuds du réseau. Ainsi, en forte densité, les messages arriveront à destination en grande majorité. En revanche, dans des réseaux creux, la présence de « trous » augmente et, de ce fait, entraîne une forte baisse du taux d'acheminement des messages (les « trous » favorisent les situations où un expéditeur n'a dans son voisinage aucun nœud mieux localisé que lui-même pour atteindre la destination ; le message est alors perdu). Deuxièmement, aucune des stratégies décrites ci-dessus ne prend en compte le critère de l'énergie.

5.1.2 Routage par faces (Face routing)

Pour éviter le problème des « trous » subi par les algorithmes greedy, le *routage par faces* a été proposé (Kranakis et al., 1999; Bose et al., 2001). Il consiste dans un premier temps à définir un graphe planaire sous graphe du réseau tel que l'ensemble des nœuds du réseau appartienne à ce graphe. Il s'agit donc de construire le graphe de Gabriel (Gabriel et Sokal, 1969) du graphe du réseau.

Définition 1. Le graphe de Gabriel $GG(V, E')$ du graphe $G(V, E)$ est un graphe géométrique dans lequel une arête (u, v) , appartenant à E , appartiendra à E' si et seulement si le disque de diamètre la distance entre u et v ne contient aucun nœud appartenant à V hormis u et v :

$$E' = \{(u, v) \in E \mid \nexists w \in V \setminus \{u, v\}, d_{uw}^2 + d_{wv}^2 \leq d_{uv}^2\}$$

Grâce à cette définition, la construction d'un graphe planaire peut se faire de façon distribuée. Pour cela, il faut que chaque capteur connaisse sa position et celle de ses voisins.

Une fois le graphe planaire construit, lorsqu'une source envoie un message à une destination, le message sera transmis le long des *faces* de ce graphe qui intersectent la droite passant par la source et la destination. Chaque face est traversée en utilisant la technique de la main droite (Bondy et Murty, 1976).

Cette technique de routage garantit l'arrivée des messages mais ces derniers peuvent emprunter des chemins très coûteux en énergie.

5.1.3 GFG (Greedy-Face-Greedy)

La technique de routage *GFG* (Bose et al., 2001) consiste à combiner un algorithme greedy avec le routage par faces. Le principe est simple : initialement, le message est routé avec l'algorithme greedy mais, en présence d'un « trou », la technique bascule en mode routage par faces pour le contourner puis revient dès que possible en mode greedy. Cette technique a le mérite de combiner les avantages des algorithmes greedy et ceux du routage par faces, mais elle ne prend pas en compte la consommation d'énergie.

5.1.4 Power Progress

La méthode *Power progress* proposée dans (Kuruvila et al., 2006) est une extension de la méthode GFG qui cette fois prend en compte la modélisation de la consommation d'énergie. En effet, la consommation d'énergie suit une loi de puissance par rapport à la portée d'émission : si d est la portée d'émission, la consommation d'énergie est supérieure à d^a avec $a \geq 2$ selon le modèle utilisé (le choix du modèle de consommation d'énergie est traité dans le chapitre suivant).

Dans cette méthode, les capteurs connaissent les positions de leurs voisins à deux sauts. Lorsqu'un capteur u veut transmettre un message à un capteur voisin v sélectionné grâce à un algorithme greedy, on vérifie s'il existe un capteur w voisin de u et voisin de v tel que la consommation d'énergie soit inférieure si le message suit le chemin uwv plutôt que le chemin direct uv . Si tel est le cas, u enverra le message à w qui de façon récursive agira selon le même procédé.

Cette méthode est la plus adaptée aux réseaux de capteurs dans le cas où ces derniers sont déployés de façon aléatoire sans connaissance préalable de l'environnement.

5.2 Le routage géographique dans les réseaux mobiles

Comme pour la localisation, le problème du routage se pose également pour les réseaux de capteurs mobiles. La mobilité des capteurs induit des connaissances limitées

quant à l'environnement du réseau et contraint de ce fait les algorithmes. Par exemple, le maintien d'une table de routage ne peut être envisagé.

Dans la littérature, il existe deux catégories parmi les méthodes de routage dans les réseaux mobiles. La première regroupe les méthodes où les capteurs basent leurs raisonnements sur les positions de leurs voisins à un ou deux sauts. La seconde est composée des méthodes qui définissent une région géographique et diffusent à l'intérieur de cette région un message pour atteindre la destination. Ces deux catégories porteront respectivement les noms *neighborhood-based routing* (routage basé sur le voisinage) et *region-based routing* (routage basé région).

Neighborhood-based routing Les méthodes de cette catégorie sont essentiellement des adaptations des méthodes de routage pour les réseaux statiques. Elles supposent que le déplacement des capteurs maintient la même distribution dans l'aire de déploiement que celle présente dans le cas où le réseau est statique. Ainsi, toutes les méthodes décrites précédemment pour les réseaux statiques peuvent être adaptées au contexte de mobilité. L'inconvénient majeur de ces techniques de routage est que les capteurs doivent systématiquement demander les positions de leurs voisins à un ou deux sauts pour pouvoir envoyer un message. Concrètement, lorsqu'un capteur doit envoyer un message vers une destination, il envoie un premier message pour demander les positions de ses voisins (l'opération est répétée par chacun des voisins, lorsque la connaissance des positions des voisins à deux sauts est requise), puis les voisins répondent et le capteur sélectionne le prochain nœud relais et lui fait suivre le message. Il est préférable, en considérant des capteurs mobiles, d'éviter de tels échanges de messages.

Region-based routing Dans cette catégorie, les capteurs n'ont besoin de connaître que leurs propres positions et celle de la destination. Lorsqu'une source souhaite envoyer un message vers une destination, elle définit une région géographique contenant sa position ainsi que celle de la destination et diffuse son message à l'intérieur de cette région pour l'atteindre. Les méthodes (Johnson et Maltz, 1996; Ko et Vaidya, 1998; Hass et al., 2002; Li et al., 2005) en sont des exemples. Les régions géographiques peuvent prendre différentes formes : par exemple, dans (Ko et Vaidya, 1998) la région utilisée est un rectangle, alors que dans (Li et al., 2005) il s'agit d'une ellipse. Une fois la région définie, la source envoie son message et lorsqu'un capteur le reçoit, il teste grâce à sa position s'il appartient à la région et, le cas échéant, fait suivre à son tour le message. Afin de consommer le moins d'énergie possible, il s'agit pour ces méthodes de définir la plus petite région possible ou bien sélectionner un sous-ensemble de nœuds relais à l'intérieur de la région. C'est ce que font, par exemple, les auteurs de (Hass et al., 2002; Li et al., 2005).

Il faut souligner à nouveau que toutes ces méthodes supposent que les capteurs connaissent leurs positions et, si nécessaire, celles de leurs voisins avec exactitude. La technique de routage dans les réseaux de capteurs mobiles qui est proposée dans la

suite de cette thèse appartient à la catégorie *region-based routing* et considère des capteurs connaissant leurs positions estimées ainsi que leurs bornes d'erreurs de position.

Les deux chapitres suivants présentent respectivement deux techniques de routage géographique en considérant pour le premier des réseaux de capteurs statiques et des réseaux de capteurs mobiles pour le second.

Chapitre 6

EEG-Routing : Routage Géographique Efficace en Energie

Ce chapitre propose une nouvelle technique de routage géographique dans les réseaux de capteurs statiques qui suppose une connaissance approximative de la topologie du réseau avant son déploiement. A la différence des techniques existantes vues précédemment, les positions des capteurs ne sont pas considérées comme étant exactes. En effet, la technique de routage se base sur les positions estimées des capteurs ainsi que sur leurs bornes d'erreurs de position. Ces inexactitudes ont été prises en compte au travers d'un modèle probabiliste pondérant chaque lien de voisinage. En s'appuyant sur ces données, l'algorithme de routage se donne comme objectif l'optimisation des deux critères que sont la consommation en énergie et le taux d'acheminement des messages.

6.1 Pré-requis

Chaque capteur localisé connaît sa borne d'erreur de position. Si le capteur X est localisé en (x_X, y_X) avec une borne d'erreur égale à ϵ_X alors, la position réelle de X se trouve à l'intérieur du disque centré en (x_X, y_X) de rayon ϵ_X . Il est supposé que sa position réelle peut se situer uniformément dans le disque.

Le réseau est constitué d'un ensemble V de n nœuds dont les positions estimées et les erreurs de position sont connues soit pas une entité globale, soit par tous les capteurs (l'application de cette dernière solution dépend de la capacité mémoire des capteurs). Par la suite, on suppose l'existence d'une entité globale. L'ensemble des arêtes est défini comme suit :

$$E = \{(u, v) \in V^2 \mid u \neq v \text{ et } d_{uv} - \epsilon_u - \epsilon_v \leq r\}$$

En fait, si aucune arête ne relie deux capteurs, ils ne peuvent communiquer entre eux. En revanche, si une arête les relie cela signifie qu'une communication est probablement possible. Cette probabilité est calculée en fonction des positions estimées des

capteurs et de leurs bornes d'erreurs de position. Chaque arête se voit alors attribuer une étiquette faisant état de la probabilité d'existence d'une relation de voisinage entre les nœuds qu'elle relie. Le calcul de cette probabilité sera expliqué ci-après.

La figure 6.1 est un exemple de déploiement de capteurs où les positions et les bornes d'erreurs sont connues. Les probabilités concernant les relations de voisinage sont notées p_1, p_2, \dots . Il est supposé que les capteurs connaissent l'existence de leurs voisins et, dans ce cas, les probabilités des arêtes les reliant sont égales à 1. Pour illustrer un tel réseau, prenons l'exemple d'un déploiement par hélicoptère : les capteurs sont largués à des endroits déterminés à l'avance, chaque capteur se verra attribuer une position estimée ainsi qu'une borne d'erreur de position qui dépendra de la vitesse de l'hélicoptère, de son altitude, ...

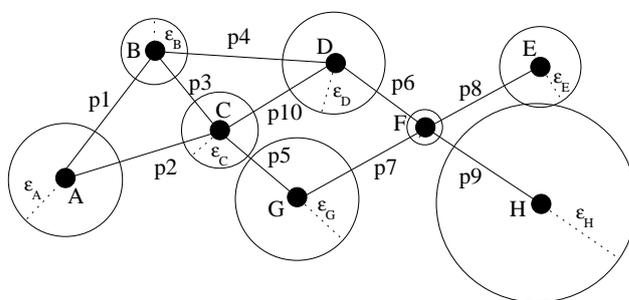


FIG. 6.1: Exemple de déploiement

Sans perte de généralités, il est supposé qu'une seule station de base dans le réseau récolte les informations des capteurs qui connaissent tous sa position exacte.

Si leur rayon d'émission est borné par r , les capteurs doivent toutefois par souci d'économie d'énergie régler, selon les expéditions à effectuer, leur puissance d'émission afin d'atteindre des distances plus courtes. Par exemple, si deux capteurs sont séparés d'une distance d , un rayon d'émission égal à d sera suffisant pour qu'ils puissent communiquer.

Afin de mesurer les performances des techniques de routage, la métrique qui sera utilisée ne sera pas le nombre de sauts nécessaires pour acheminer un message, mais l'énergie consommée pour son acheminement. Seuls des messages de taille constante et petite sont considérés.

6.2 Modèle énergétique et rayon d'émission optimal

Le modèle énergétique considéré par la suite est celui proposé dans (Rodoplu et Meng, 1998a). Il s'agit du modèle communément utilisé dans la littérature pour les

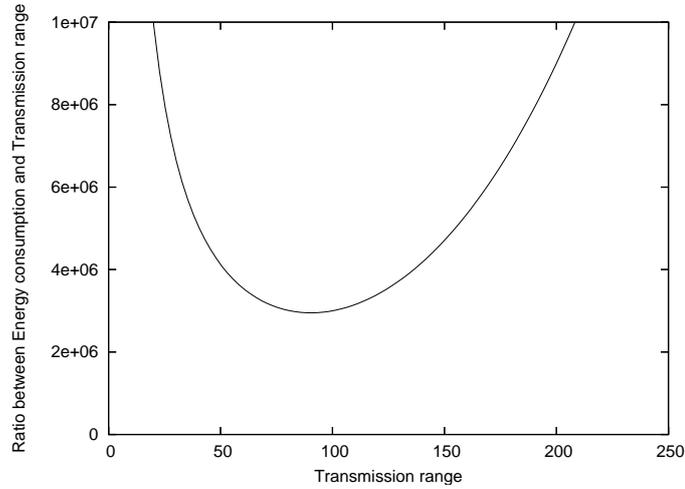


FIG. 6.2: $E(d)$ en fonction du rayon d'émission d

réseaux de capteurs. La dépense d'énergie $J(d)$ est fonction de la distance d'émission d en suivant une loi de puissance :

$$J(d) = \begin{cases} d^a + c & , \text{ si } d \neq 0, \text{ avec } a \geq 2 \\ 0 & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (6.1)$$

La constante c prend en compte les coûts relatifs aux tâches réalisées lors de la réception d'un signal. Dans (Feeney, 2001a), les auteurs montrent que différents coûts, hormis celui de la portée d'émission, doivent être ajoutés. Il s'agit, par exemple, de la préparation et du traitement du message par la couche physique.

Les auteurs de (Rodoplu et Meng, 1998a) assignent les valeurs suivantes aux constantes :

$$a = 4 \text{ et } c = 2 \times 10^8$$

Ce modèle énergétique ainsi que les valeurs des constantes a et c seront utilisés dans les sections suivantes.

A partir de ce modèle énergétique, il s'agit maintenant de déterminer le rayon d'émission optimal qui correspond au meilleur ratio entre la consommation d'énergie et la portée d'émission. Ce ratio est calculé de la façon suivante :

$$E(d) = \frac{J(d)}{d} = \frac{d^4 + 2 \times 10^8}{d} \quad (6.2)$$

Le graphe en figure 6.2 représente la courbe de cette fonction avec en abscisse le rayon d'émission noté d variant de 0 à 250. Le rayon d'émission optimal d_{opt} correspond à la distance telle que le ratio $E(d)$ soit le plus petit possible.

Cette valeur se calcule analytiquement en dérivant la fonction $E(d)$. Cette dérivée, notée $E'(d)$, est la suivante :

$$E'(d) = 3d^2 - \frac{2 \times 10^8}{d^2} \quad (6.3)$$

Pour obtenir la valeur du rayon d'émission optimal d_{opt} , il suffit de chercher la valeur de d pour laquelle $E'(d) = 0$, ce qui donne :

$$d_{opt} = \sqrt[4]{\frac{2 \times 10^8}{3}} \approx 90.36 \quad (6.4)$$

Les capteurs ont donc tout intérêt à émettre à une distance proche de d_{opt} .

6.3 Définition de la métrique

EEG-Routing s'appuie sur une métrique qui définit le coût d'un lien de communication comme une fonction de trois paramètres que sont la probabilité d'existence du lien après déploiement, son coût énergétique donné par (6.1) et son *progrès* qui traduit l'avancée du message vers la destination. Le progrès entre un émetteur et un récepteur est calculé comme étant la différence des distances entre l'émetteur et la station de base et le récepteur et la station de base. La valeur du progrès entre deux capteurs n'étant pas symétrique, le réseau sera représenté par un graphe orienté et chaque arc se verra assigner un coût défini par la métrique.

Les sections suivantes considèrent un arc (A, B) reliant les deux capteurs A et B dont les positions respectives sont notées (x_A, y_A) et (x_B, y_B) et leurs bornes d'erreurs de position ϵ_A et ϵ_B . Elles présentent les calculs effectués pour obtenir la probabilité de communication p_{AB} entre les capteurs A et B , puis le ratio q_{AB} entre la consommation d'énergie de ce lien de communication et son progrès. Enfin, le coût de l'arc (A, B) est donné.

6.3.1 Calcul de la probabilité de communication

Le calcul de la probabilité p_{AB} dépend des positions estimées des capteurs, de leurs bornes d'erreurs de position et du rayon maximal de transmission r .

Ce calcul diffère selon trois cas. Le premier considère les positions des capteurs A et B comme étant exactes (i.e. $\epsilon_A = \epsilon_B = 0$). Pour le second, seulement un capteur a une position estimée tandis que le second est localisé exactement (i.e. $\epsilon_A > 0$ et $\epsilon_B = 0$). Enfin, dans le dernier cas, les deux capteurs ont des positions estimées (i.e. $\epsilon_A > 0$ et $\epsilon_B > 0$). Ces probabilités sont considérées comme étant indépendantes entre elles.

Les deux capteurs sont localisés exactement

Le premier cas est le plus simple. Lorsque les deux capteurs sont localisés exactement, la probabilité est obtenue comme suit :

$$p_{AB} = \begin{cases} 1 & , \text{ si } d_{AB} \leq r \\ 0 & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (6.5)$$

En d'autres termes, lorsque la distance euclidienne entre les capteurs A et B est inférieure au rayon de transmission maximal, alors ils peuvent communiquer entre eux, autrement ils sont hors de portée d'émission.

Un des deux capteurs est localisé exactement

Supposons que le capteur A est localisé avec une erreur de position et le capteur B est localisé exactement. La figure 6.3 illustre ce cas.

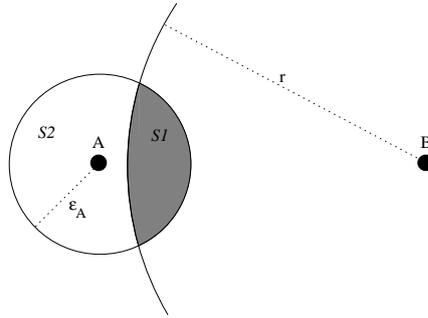


FIG. 6.3: B est localisé exactement tandis que A non (i.e. $\epsilon_A > 0$ et $\epsilon_B = 0$)

La position réelle de A peut se situer uniformément dans le disque centré en A et ayant comme rayon ϵ_A . Le rayon d'émission étant borné par r , le disque centré en A se divise en deux surfaces : la première notée S_1 , représentée en gris sur la figure 6.3, et la deuxième notée S_2 , qui correspond à la surface du disque moins S_1 . En fait, si la position exacte du capteur A se situe à l'intérieur de la surface S_1 , alors les capteurs A et B peuvent communiquer. A l'inverse, si elle se situe dans la surface S_2 , alors aucune communication n'est possible entre ces deux capteurs.

Le calcul de la probabilité de communication entre ces deux nœuds se ramène donc à un rapport de surfaces :

$$p_{AB} = \begin{cases} 1 & , \text{ si } d_{AB} < r - \epsilon_A \\ 0 & , \text{ si } d_{AB} > r + \epsilon_A \\ \frac{S_1}{\pi \epsilon_A^2} & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (6.6)$$

Les deux capteurs ont des positions estimées

Dans ce dernier cas, les capteurs A et B sont localisés avec des erreurs de position. La figure 6.4 illustre cette situation.

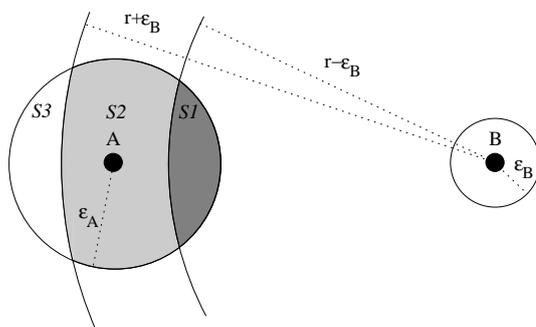


FIG. 6.4: A et B ont des positions estimées (i.e. $\epsilon_A > 0$ et $\epsilon_B > 0$)

De par l'erreur de position de B , la portée maximale du rayon de transmission est incertaine. Elle se situe entre les deux cercles centrés en B de rayons $r - \epsilon_B$ et $r + \epsilon_B$. En prenant en compte cette donnée dans la figure 6.4, trois surfaces S_1 , S_2 et S_3 sont obtenues. Une probabilité de communication est associée à chacune de ces surfaces. Ces probabilités sont notées p_1 pour S_1 , p_2 pour S_2 et p_3 pour S_3 . Elles correspondent à la probabilité de communication entre les capteurs A et B , si le capteur A se situe respectivement en S_1 , S_2 et S_3 .

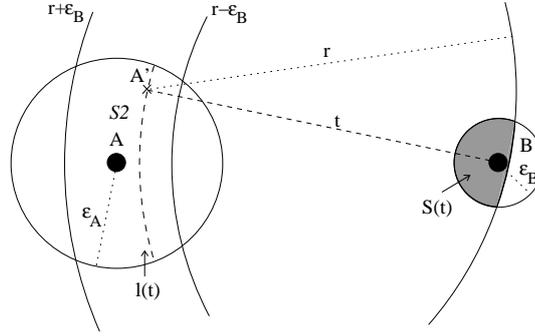
La probabilité p_{AB} est obtenue de la façon suivante :

$$p_{AB} = \begin{cases} 1 & , \text{ si } d_{AB} < r - \epsilon_A - \epsilon_B \\ 0 & , \text{ si } d_{AB} > r + \epsilon_A - \epsilon_B \\ \frac{S_1 * p_1 + S_2 * p_2 + S_3 * p_3}{\pi * \epsilon_A^2} & , \text{ sinon} \end{cases} \quad (6.7)$$

Intéressons nous au troisième cas de cette équation (i.e. $r - \epsilon_A - \epsilon_B \leq d_{AB} \leq r + \epsilon_A - \epsilon_B$). Lorsque le capteur A appartient à la surface S_1 , les capteurs A et B peuvent communiquer, par conséquent $p_1 = 1$. Par contre, si le capteur A appartient à la surface S_3 , aucune communication n'est possible et donc $p_3 = 0$. La formule se simplifie comme suit :

$$p_{AB} = \frac{S_1 + S_2 * p_2}{\pi * \epsilon_A^2} \quad (6.8)$$

Il reste donc à déterminer le calcul de la probabilité p_2 dont l'explication s'appuie sur la figure 6.5. Cette probabilité s'obtient en calculant la moyenne des probabilités de communication de chacune des positions possibles pour le capteur A dans la surface S_2 . Fixer comme point d'ancrage la position estimée de B revient à faire varier la distance


 FIG. 6.5: Explication du calcul de la probabilité p_2

entre les capteurs A et B dans l'intervalle $[r - \epsilon_B, r + \epsilon_B]$. Cette variable est notée t . A une valeur de t donnée correspond un ensemble de points appartenant à l'arc formé par l'intersection du cercle centré en A de rayon ϵ_A et celui de centre B de rayon t . La longueur de cet arc est notée $l(t)$. Si on considère une position possible de A appartenant à cet arc, par exemple A' sur la figure 6.5, la probabilité que A puisse communiquer avec B s'il est en A' est donnée par le rapport de surfaces suivant :

$$\frac{S(t)}{\pi * \epsilon_B^2} \quad (6.9)$$

La surface $S(t)$ est définie comme étant l'intersection des disques centrés en B de rayon ϵ_B pour le premier et en A' de rayon r pour le second. Or, pour chaque arc défini par t , il existe un invariant : la surface $S(t)$ est identique pour tous les points appartenant à un même arc. Ainsi, la somme des probabilités des points appartenant à un même arc est donnée par le produit de la longueur de l'arc $l(t)$ et la probabilité de communication donnée par 6.9 :

$$l(t) \frac{S(t)}{\pi * \epsilon_B^2} \quad (6.10)$$

Pour obtenir la probabilité p_2 , c'est à dire la moyenne des probabilités de communication en chacun des points appartenant à S_2 , il suffit maintenant de faire la moyenne des différentes valeurs données par 6.10 sur l'intervalle $[r - \epsilon_B, r + \epsilon_B]$:

$$p_2 = \frac{1}{S_2} \int_{r-\epsilon_B}^{r+\epsilon_B} l(t) \frac{S(t)}{\pi * \epsilon_B^2} dt \quad (6.11)$$

6.3.2 Ratio entre la consommation d'énergie et le progrès

Cette section définit un ratio normalisé entre 0 et 1 dépendant de la consommation d'énergie d'un arc et de son progrès. Le but étant de favoriser les arcs présentant le meilleur compromis entre la dépense d'énergie et le progrès. Le ratio de l'arc (A, B) est noté q_{AB} et son progrès pg_{AB} .

En s'appuyant sur le modèle énergétique, le ratio optimal est défini comme étant :

$$E(d_{opt}) = \frac{J(d_{opt})}{d_{opt}} \quad (6.12)$$

avec les fonctions J et E définies par (6.1) et (6.2) et d_{opt} le rayon de transmission optimal défini par (6.4).

Le ratio de l'arc (A, B) est donné par :

$$\frac{J(d_{AB})}{p g_{AB}} \quad (6.13)$$

Plus le ratio d'un arc sera proche (resp. éloigné) du ratio optimal, plus cet arc sera avantagé (resp. pénalisé). L'arc (A, B) sera donc avantagé (resp. pénalisé) lorsque q'_{AB} tendra vers 1 (resp. 0), avec q'_{AB} défini comme suit :

$$q'_{AB} = \frac{E(d_{opt})}{\frac{J(d_{AB})}{p g_{AB}}} \quad (6.14)$$

q'_{AB} appartient à l'intervalle $[-1, 1]$ puisque le progrès peut être négatif. Pour normaliser q_{AB} entre 0 et 1, la formule suivante est utilisée :

$$q_{AB} = \frac{q'_{AB} + 1}{2} = \frac{p g_{AB} \times E(d_{opt}) + J(d_{AB})}{2J(d_{AB})} \quad (6.15)$$

6.3.3 Calcul du coût d'un arc

Le calcul de la probabilité de communication d'un arc ainsi que celui de son ratio, dépendant de sa consommation d'énergie et de son progrès, viennent d'être expliqués. Le coût C_{AB} de l'arc (A, B) doit donc s'exprimer à partir de ces deux éléments qui prennent bien en compte les trois critères imposés par la métrique : la probabilité de communication, la consommation d'énergie et le progrès.

Le coût C_{AB} est calculé comme suit :

$$C_{AB} = 1 - [\alpha p_{AB} + (1 - \alpha) q_{AB}] \quad \text{avec } \alpha \in [0, 1] \quad (6.16)$$

Chacun des arcs est pondéré avec un coût élevé (resp. faible) s'il présente une faible (resp. forte) probabilité de communication et un faible (resp. fort) ratio. La variable α , quant à elle, attribue une priorité soit à la probabilité, soit au ratio.

Les simulations montreront l'importance de cette métrique pour obtenir le meilleur compromis entre les deux critères d'optimisation que sont le taux d'acheminement des messages et la consommation d'énergie.

La métrique étant définie, la section suivante présente l'algorithme de routage EEG-Routing.

6.4 EEG-Routing

L'algorithme de routage EEG-Routing (Energy Efficient Geographic Routing) se décompose en deux phases : la première s'attache au traitement des données du réseau avant le déploiement des capteurs et la seconde s'intéresse à l'acheminement des messages vers la station de base.

6.4.1 Avant le déploiement

La première phase de traitement se fait avant le déploiement des capteurs et s'appuie sur la vision globale du réseau en intégrant les incertitudes sur les relations de voisinage. Grâce à la métrique, le coût de chaque arc prend en compte sa probabilité d'existence ainsi que son ratio entre la dépense énergétique et son progrès. Par conséquent, il est possible de calculer le coût minimum du chemin d'un capteur vers la station de base grâce à un algorithme du plus court chemin comme celui de Dijkstra. Il est important de souligner que l'existence de ce chemin n'est évidemment pas garantie, l'existence des liens de communication le composant n'étant pas sûre.

S'il existe un arc entre deux capteurs, ils sont considérés comme voisins probables. A un capteur u donné correspond donc une liste de voisins probables auxquels des coûts sont associés. Le coût d'un voisin correspond à celui du plus court chemin de u vers la station de base s'il passe par ce voisin. Une table de coûts notée Tab_Costs_u stocke ces informations et est enregistrée dans le capteur u .

6.4.2 Après le déploiement

Une fois le déploiement des capteurs effectué, un échange de messages *Hello* a pour but de mettre à jour les entrées des tables de coûts des capteurs. Par exemple, lorsque u reçoit un message *Hello* d'un voisin v , il est certain de l'existence du lien de communication. Par conséquent, la probabilité p_{uv} vaut 1 et u met à jour le coût C_{uv} de l'arc (u, v) dans sa table Tab_Costs_u . En revanche, il élimine de Tab_Costs_u toutes les entrées correspondant aux voisins dont il n'a pas reçu de messages *Hello* puisqu'ils n'appartiennent pas à son voisinage.

Après la phase de mise à jour, lorsqu'un capteur décide d'envoyer un message vers la station de base, il sélectionne parmi ses voisins celui dont le coût du chemin est minimum.

Lorsqu'un capteur détecte un événement, il envoie à la station de base un message qui contient les champs suivants :

- l'identifiant du message ;
- le coût du chemin de secours ;
- la position du capteur afin de localiser l'événement détecté ;
- les informations relatives à l'événement détecté.

Le coût du chemin de secours bkp correspond au deuxième meilleur coût dans la table de coûts. Le capteur expéditeur n'étant pas assuré de l'existence du chemin vers la station de base qu'il a sélectionné, il avertit le receveur, grâce à cette information, qu'il possède un second chemin possible. Cette information sera également utilisée par le receveur pour mettre à jour sa table de coûts.

L'acheminement d'un message se déroule comme suit : lorsque le capteur v reçoit un message envoyé par le capteur u , il en déduit qu'il est le meilleur choix de u pour atteindre la station de base. Le capteur v met à jour sa table de coûts grâce au coût du chemin de secours bkp_u contenu dans le message. Le coût du chemin de secours bkp_u est calculé en fonction des informations locales de u . Par conséquent, v remplacera le coût de son chemin passant par u obtenu à partir du modèle probabiliste par cette information en effectuant l'opération $Tab_Costs_v(u) = bkp_u + C_{vu}$, où C_{vu} est le coût de l'arc (v, u) . Une fois cette mise à jour effectuée, le capteur v modifie le message en échangeant le coût du chemin de secours de u par le sien, puis sélectionne parmi ses voisins celui dont le coût du chemin est minimum dans sa table Tab_Costs_v et lui fait suivre le message.

Au départ, les capteurs se basent sur des données issues d'une vision globale du réseau, mais une fois le déploiement effectué, ils mettent tous à jour leurs données en fonction de leurs voisinages. Lorsqu'un capteur sélectionne un voisin dont le coût associé pour atteindre la destination est minimum, il espère que le message suivra le chemin correspondant à ce coût. Or, chaque capteur intermédiaire sélectionne le meilleur voisin en terme de coût en se basant sur ses connaissances mises à jour en fonction de son voisinage. Ce coût peut ne plus correspondre à celui du chemin initialement prévu.

La figure 6.6 est un exemple de représentation d'un réseau avant son déploiement. Chaque arc est étiqueté avec son coût. Les tables des coûts sont alors initialisées pour chacun des capteurs avant le déploiement (cf. première colonne du tableau 6.1) puis mises à jour après l'échange des messages *Hello* (cf. deuxième colonne du tableau 6.1). Après cet échange de messages, les capteurs E et H déduisent qu'ils ne peuvent communiquer entre eux et suppriment dans leurs tables de coûts les entrées qui les concernent. Même chose pour les capteurs F et G . Inversement, lorsqu'un capteur confirme l'existence d'un lien de communication avec un voisin, il met à jour le coût du chemin associé à ce voisin en recalculant le coût de l'arc qui le relie (avec la probabilité d'existence du lien de communication égale à 1). Les capteurs sont ensuite aptes à communiquer avec la station de base notée SB sur la figure 6.6.

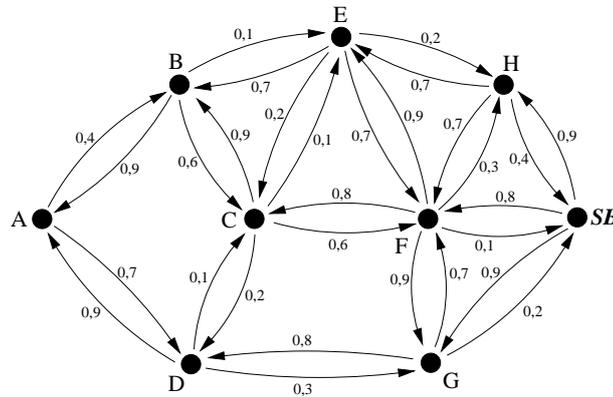


FIG. 6.6: Exemple d'un réseau avant déploiement

Capteurs	Tables de coûts avant déploiement	Tables de coûts après déploiement
A	[(B ;1.1), (D ;1.2)]	[(B ;0.8), (D ;1.0)]
B	[(A ;2.1), (C ;1.3), (E ;0.7)]	[(A ;2.0), (C ;1.1), (E ;0.7)]
C	[(B ;2.2), (D ;0.7), (E ;0.7), (F ;0.7)]	[(B ;1.0), (D ;0.7), (E ;0.7), (F ;0.6)]
D	[(A ;2.0), (C ;0.8), (G ;0.5)]	[(A ;1.8), (C ;0.8), (G ;0.4)]
E	[(B ;1.4), (C ;0.9), (F ;0.8), (H ;0.6)]	[(B ;1.2), (C ;0.8), (F ;0.8)]
F	[(C ;1.5), (E ;1.5), (G ;1.1), (H ;0.7), (SB ;0.1)]	[(C ;1.2), (E ;1.3), (H ;0.7), (SB ;0.1)]
G	[(D ;1.3), (F ;0.8), (SB ;0.2)]	[(D ;1.1), (SB ;0.1)]
H	[(E ;1.3), (F ;0.8), (SB ;0.4)]	[(F ;0.7), (SB ;0.2)]

TAB. 6.1: Tables de coûts des capteurs avant et après déploiement pour l'exemple de la figure 6.6

Voici l'exemple d'un scénario de routage dans ce réseau : le capteur A souhaite envoyer un message à la station de base. Il envoie son message au voisin dont le coût est minimum dans sa table de coûts [(B ;0.8), (D ;1.0)], en l'occurrence le voisin B . Le coût associé à B correspond au chemin A, B, E, H, SB . Le message contient également le coût du chemin de secours bkp_A de A qui vaut alors 1.0. Lorsque le capteur B reçoit ce message, il met à jour les données de sa table correspondant à A dont le coût associé devient $bkp_A + C_{BA}$. En fonction de sa table de coûts devenue [(A ;1.8), (C ;1.1), (E ;0.7)], il fait suivre le message au voisin E dont le coût associé correspond au chemin B, E, H, SB avec le coût de son chemin de secours $bkp_B = 1.1$. Après réception de ce message, le capteur E met à jour les données de B dans sa table de coûts comme suit [(B ;1.6), (C ;0.8), (F ;0.8)] et fait suivre à son voisin C (le choix entre C et F est arbitraire) dont le coût associé correspond au chemin E, C, D, G, SB . Le capteur C sélectionnera dans sa table [(B ;1.0), (D ;0.7), (E ;0.9), (F ;0.6)] le capteur F dont le coût correspond au chemin F, SB et enfin, en fonction de sa table [(C ;1.2), (E ;1.3), (H ;0.7), (SB ;0.1)], F transmettra le message à SB .

L'efficacité de cet algorithme réside dans sa capacité à remettre en question les chemins à utiliser puisque chaque nœud se base sur ses propres connaissances ; c'est ce qui lui

permet d'être tolérant aux pannes et aux apparitions de capteurs (ce point est abordé ci-après). Toutefois, un tel comportement peut dans certains cas générer des boucles. La section suivante présente comment ces dernières sont éliminées.

6.4.3 Elimination des boucles

L'apparition de boucles est induite par les décisions prises par les capteurs lorsqu'ils sélectionnent un voisin pour acheminer un message vers la station de base. Il faut donc éviter qu'un capteur prenne deux fois la même décision si celle-ci engendre une boucle. Ainsi, lorsqu'un capteur u envoie un message à son voisin v , puis reçoit ce même message par un autre voisin w , le capteur u détecte une boucle et s'interdit de faire suivre à nouveau un message à v . Le voisin w est forcément différent du voisin v car si u recevait un retour de message de v à cause d'une boucle, v l'aurait détectée avant u et l'aurait alors éliminée. Par conséquent, lorsque u reçoit directement le message de v , il ne s'agit pas d'une boucle mais cela signifie tout simplement que u est le meilleur choix de v pour acheminer le message vers la destination.

6.4.4 Tolérance aux pannes et aux apparitions de capteurs

Un capteur est dit en panne lorsqu'il n'est plus dans la capacité d'inter-agir avec les autres nœuds du réseau (par exemple lorsque sa batterie est vide). L'algorithme EEG-Routing assure la gestion des pannes et garantit la continuité du routage malgré celles-ci. Avant toute chose, il faut rappeler qu'un capteur prend une décision locale basée sur des suppositions sur l'existence de liens de communication distants. La non-existence d'un lien après déploiement peut être assimilée à une panne de lien de communication. Par conséquent, la gestion des pannes de capteurs ne change en rien le comportement de l'algorithme. Il suffit de tester périodiquement l'existence des liens de voisinage grâce à l'échange d'un message *I_am_alive*. Lorsqu'un capteur ne reçoit pas de message *I_am_alive* en provenance d'un de ses voisins, il en conclut que ce voisin est en panne et met à jour sa table de coûts afin de ne plus considérer les informations qui lui sont associées. Ensuite, si le capteur doit faire suivre un message vers la station de base, il continuera à prendre ses décisions en fonction de sa table de coûts.

Le même raisonnement s'applique dans le cas de l'apparition d'un capteur (déploiement d'autres capteurs après le premier déploiement par exemple). L'échange de messages

I_am_alive permettra de prendre en compte ces apparitions de capteurs. Les nouveaux capteurs auront des données de routage sur l'intégralité du réseau. En revanche, les capteurs du premier déploiement continueront à baser leurs décisions en fonction de leurs données initiales. Les informations fournies par les messages *I_am_alive* ou les coûts des chemins de secours calculés à partir de ces nouveaux capteurs leur permettront de mettre à jour leurs tables de coûts.

6.5 Simulations

L'algorithme EEG-Routing est la première technique de routage basée sur des positions non exactes et des erreurs de position non bornées. Le comparer aux autres algorithmes de routage géographique ne serait pas pertinent puisque les hypothèses de départ sont différentes. Par conséquent, les performances d'EEG-Routing sont analysées en comparaison à un *oracle*. Il s'agit du même algorithme que EEG-Routing mais où les liens de communication sont connus avec certitude. Les chemins qu'il sélectionne sont donc optimaux en terme d'énergie et l'acheminement des messages est assuré. Ces simulations s'appuient sur l'écart entre EEG-Routing et cet oracle, pour les deux critères d'analyse cités précédemment, afin de valider ou non la technique de routage.

6.5.1 Environnement des simulations

Pour l'évaluation de l'algorithme EEG-Routing, un simulateur a été développé. La couche physique est considérée comme étant idéale (pas de perte de paquets). Les topologies des réseaux contiennent 100 nœuds répartis aléatoirement avec une distribution uniforme dans une aire de 1200×1200 . En faisant varier le rayon de transmission, la densité en capteurs varie de 6 à 20.

Pour chaque capteur $u \in V$, les éléments suivants sont sélectionnés aléatoirement avec une distribution uniforme :

- (x_u, y_u) : la position estimée du capteur u dans le carré 1200×1200 ;
- ϵ_u : la borne d'erreur de position de u , comprise entre 0 et 100% ;
- la position réelle de u sélectionnée à l'intérieur du disque centrée en (x_u, y_u) de rayon ϵ_u .

La position de la station de base est sélectionnée également de façon uniforme mais sans erreur de position. Cette position est connue de tous les capteurs. Durant le déroulement des scénarios, chaque capteur détecte un événement et envoie un message à destination de la station de base.

6.5.2 Résultats

Les deux premiers graphes de la figure 6.7 représentent respectivement le taux de délivrance des messages envoyés par les capteurs à la station de base (figure 6.7a) et le pourcentage d'énergie supplémentaire consommé par EEG-Routing pour acheminer ces messages par rapport à l'oracle (figure 6.7b). Chacun des graphes contient quatre courbes représentant des densités de capteurs égales à 6, 10, 14 et 18. Ces courbes sont obtenues en faisant varier la valeur du paramètre α afin de favoriser soit la probabilité d'existence d'un lien de communication, soit l'énergie par rapport au progrès.

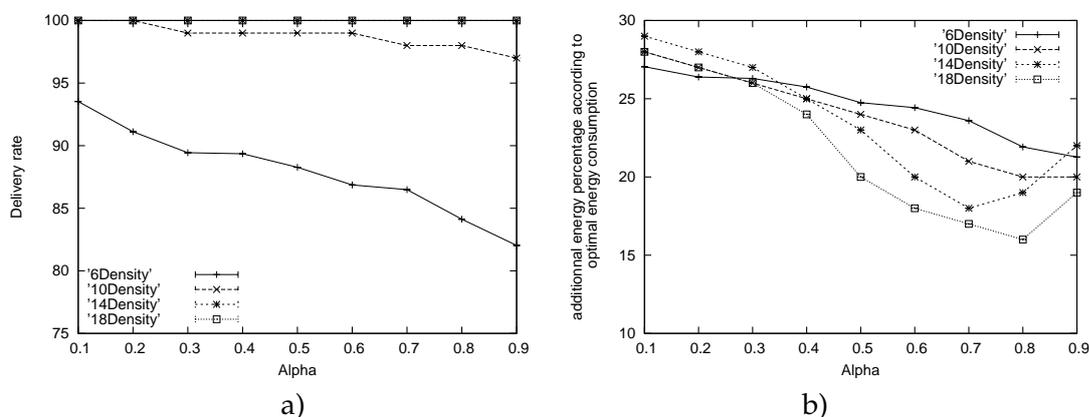


FIG. 6.7: Impacts du paramètre α sur : a) le taux de livraison des messages b) la consommation d'énergie

Le premier graphe (figure 6.7a) montre que le choix de la valeur de α est déterminant pour des petites densités (6 et 10) puisque le taux d'acheminement est maximal lorsque la valeur de α est petite. En favorisant le paramètre lié au progrès pour ces densités, les chances de voir des boucles diminuent puisque les retours arrière sont faibles. Par conséquent, le nombre de chemins supprimés à cause des boucles diminue ce qui augmente le taux d'acheminement des messages. Pour les autres densités, le taux d'acheminement est de 100% quelle que soit la valeur de α .

En revanche, dans le second graphe traitant de la consommation d'énergie, les différentes valeurs du paramètre α ont un impact sur les résultats. En effet, les quatre courbes confirment que plus la valeur de α est élevée, plus la consommation d'énergie diminue. En augmentant le α , on favorise les probabilités d'existence des liens de communication et par conséquent on diminue les chances de sélectionner des chemins composés de liens de communication qui n'existent finalement pas après déploiement. Par contre, une trop grande valeur de ce paramètre (α proche de 1) n'est pas souhaitable puisque dans ce cas, le progrès et la consommation d'énergie ne sont peu ou pas pris en compte ce qui explique, sur le graphe 6.7b, la remontée des courbes après une descente nette de la consommation d'énergie (en particulier pour les courbes représentant les densités 14 et 18).

Grâce à une analyse croisée des deux graphes précédents, il est possible de déterminer le meilleur α pour chacune des densités étudiées. Il s'agit, pour une densité donnée, de sélectionner la ou les valeurs de α telles que le taux d'acheminement des messages soit supérieur à 99% (lorsque c'est possible) puis conserver celle dont la consommation d'énergie est la plus faible.

Le tableau 6.2 fait la synthèse des choix des valeurs du paramètre α en fonction de la densité en capteurs.

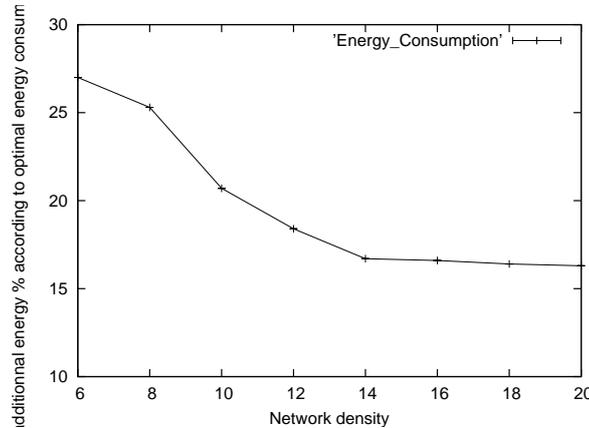


FIG. 6.8: Impacts de la densité du réseau sur la consommation de l'énergie

Densité	6	8	10	12	14	16	18	20
α	0.1	0.3	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8
Taux de délivrance	94	99	99	99	100	100	100	100

TAB. 6.2: Meilleures valeurs du paramètre α en fonction de la densité

Finalement, le dernier graphe illustré en figure 6.8 représente le pourcentage d'énergie supplémentaire consommé par l'algorithme par rapport à l'oracle. Cette courbe est obtenue en faisant varier la densité en capteurs et, pour chacune de ces densités, les valeurs de α résumées dans le tableau 6.2 sont utilisées. Le premier constat est que la consommation d'énergie diminue lorsque la densité augmente : à partir d'une densité supérieure à 14, le pourcentage d'énergie supplémentaire par rapport à l'oracle avoisine les 16%. Toutefois, même en faible densité les résultats restent satisfaisants puisque le pourcentage d'énergie supplémentaire ne dépasse pas les 28%.

6.6 Conclusion

L'originalité de la méthode de routage dans les réseaux statiques proposée dans ce chapitre est de considérer non pas les positions exactes mais estimées attribuées aux capteurs. L'imprécision de ces positions engendre des incertitudes quant à l'existence des liens de communication entre les capteurs. L'algorithme de routage proposé ici s'appuie sur deux points forts. D'abord, les capteurs commencent par se baser sur des informations jugées valables à une certaine probabilité près puis, au fur et à mesure que des messages sont reçus, apprennent et corrigent ces données. Ensuite, pour un modèle énergétique donné, il utilise la notion de rayon de transmission optimal en terme de progression du message vers la destination, ce qui est essentiel du point de vue de la consommation d'énergie. Cette notion pourra être reprise notamment dans des travaux futurs sur le routage ou la diffusion.

En revanche, son inconvénient est de ne pas garantir l'arrivée des messages à cause d'une gestion rigide des boucles. Une autre solution consisterait à pénaliser un arc (en terme de coût) au lieu de le supprimer ce qui reviendrait à dissuader le capteur de l'utiliser sans toutefois l'en empêcher. Mais, en y regardant de plus près, on constate que cette solution pourrait, dans certains cas, être désastreuse en terme de consommation d'énergie (un message pourrait, dans le pire des cas, faire un parcours en profondeur du réseau avant d'atteindre le destinataire).

En l'état, la méthode assure un fort taux d'acheminement des messages tout en ne consommant que peu d'énergie (par rapport à l'algorithme optimal).

Chapitre 7

Ellipse-Routing : Une technique de routage dans les réseaux mobiles

Ce chapitre présente une nouvelle technique de routage géographique adaptée aux réseaux mobiles. L'état de l'art des techniques de routage fait ressortir deux catégories de méthodes adaptées à la mobilité. Dans la première, chaque capteur connaît les positions de ses voisins à un ou deux sauts de lui tandis que dans la seconde, il a uniquement besoin de connaître sa propre position. La méthode proposée dans ce chapitre appartient à cette seconde catégorie mais se différencie des techniques existantes en considérant les erreurs de position des capteurs. Elle reprend l'étude décrite dans (Li et al., 2005), la complète puis propose une adaptation afin de prendre en compte le modèle énergétique utilisé ainsi que les erreurs de position des capteurs. La section suivante rappelle le contenu des travaux décrits dans (Li et al., 2005).

7.1 Routage probabiliste dans une ellipse

7.1.1 Principe de la méthode

Sans perte de généralités, il est supposé que le réseau ne contient qu'une seule destination dont la position est connue de tous les capteurs. Les capteurs sont déployés dans un carré unitaire avec une distribution uniforme et connaissent leurs positions exactes.

Le principe général de cette méthode est le suivant : lorsqu'une source souhaite envoyer un message vers la destination, elle définit une ellipse contenant sa position et celle de la destination (supposée fixe) et diffusera son message à l'intérieur de celle-ci. Sa position (x_S, y_S) , celle de la destination (x_D, y_D) , la distance d qui les sépare et enfin un facteur l définissent l'ellipse. La source envoie à ses voisins son message et chaque capteur appartenant à l'ellipse fait suivre à son tour le message à une certaine probabilité près, et ainsi de suite jusqu'à atteindre la destination. Afin d'éviter les faux

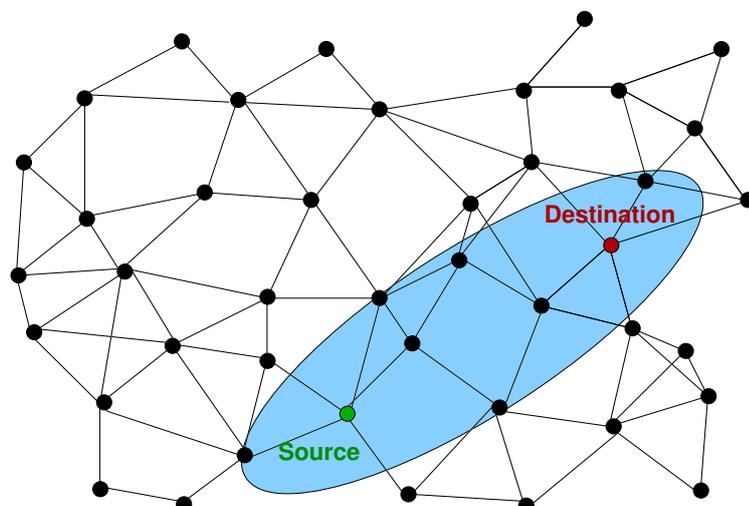


FIG. 7.1: Exemple d'une ellipse pour l'acheminement d'un message d'une source vers une destination

départs ou arrivées des messages, tous les nœuds voisins de la source et ceux voisins de la destination sont également relais du message, qu'ils soient en dedans ou en dehors de l'ellipse. La figure 7.1 est un exemple de sous ensemble de capteurs formé par une ellipse pour l'acheminement d'un message d'une source vers la destination.

Préalablement, il est nécessaire de s'assurer que le sous graphe formé par les capteurs appartenant à l'ellipse est connexe afin de garantir l'acheminement du message. Le problème de la connexité d'un graphe a été très étudié par Gupta et Kumar à qui on doit le résultat suivant (Gupta et Kumar, 1998) : Soit $G(V, r)$ un graphe tel que V soit l'ensemble des n capteurs et r leur portée d'émission, deux capteurs sont voisins s'ils sont séparés d'une distance inférieure à r .

Théorème 1. $G(V, r)$ est asymptotiquement connexe avec une probabilité de 1 lorsque n tend vers l'infini si la condition suivante est respectée :

$$n\pi.r^2 \geq \ln(n) + c(n) \quad (\text{avec } \lim_{n \rightarrow \infty} c(n) = \infty).$$

Dans (Gupta et Kumar, 1998), Gupta et Kumar font la conjecture qu'un graphe, dont les nœuds ont une probabilité p d'être en panne, est connexe si la condition suivante est respectée :

$$pn\pi.r^2 \geq \ln(n) + c(n) \quad (\text{avec } \lim_{n \rightarrow \infty} c(n) = \infty). \quad (7.1)$$

Cette conjecture a été démontrée dans (Wan et al., 2002).

Dans le cadre du routage, cette probabilité p peut être assimilée à la probabilité pour les capteurs d'être relais d'un message. En effet, dire qu'un capteur est en panne est équivalent à dire qu'il ne relaiera pas un message. Ainsi, tous les capteurs de l'ellipse ne sont pas considérés comme des nœuds relais (sauf si $p = 1$) et seul un sous ensemble est sélectionné. Si la condition énoncée en (7.1) est respectée alors les capteurs relais appartenant à cet ensemble seront suffisants pour acheminer un message de la source vers la destination. Par exemple, lorsque p vaut 0.5 et que la condition (7.1) est respectée, les capteurs auront une chance sur deux d'appartenir à l'ensemble des nœuds relais et le message atteindra la destination.

Le facteur d'ellipse l ainsi que la position de la destination sont connus de tous les capteurs avant leur déploiement. En revanche, les capteurs n'apprennent la position de la source qu'à la réception de son message (la source ayant préalablement inscrit sa position dans le message avant son envoi). Lorsqu'un capteur u reçoit un message, il détermine, en fonction de sa position, son appartenance à l'ellipse si les distances qui le séparent de la source d_{Su} et la destination d_{uD} respectent la condition suivante :

$$d_{Su} + d_{uD} \leq ld \quad (7.2)$$

Il s'agit maintenant de définir la probabilité qu'un capteur soit relais. On suppose que n capteurs sont déployés uniformément dans un carré dont la longueur des côtés est notée a . Le nombre de nœuds dans l'ellipse, noté N , est calculé de la façon suivante :

$$N = \frac{n}{a^2} \cdot \mathcal{A}_e = \frac{n}{a^2} \cdot \frac{\pi l \sqrt{l^2 - 1}}{4} d^2 \quad (7.3)$$

avec \mathcal{A}_e étant l'aire de l'ellipse.

La probabilité p qu'un capteur soit relais d'un message est définie de la façon suivante :

$$p \geq \frac{\ln N + c(N)}{N \cdot \pi (r/a)^2} \quad (7.4)$$

Le terme $c(N)$ intègre un certain nombre de paramètres tels que l'environnement du réseau. En négligeant ce terme, on obtient une valeur minimale de p .

7.1.2 Résultats des simulations

Pour évaluer leur méthode, les auteurs se focalisent sur le pourcentage moyen de nœuds relais lorsque des messages sont envoyés. Cette étude est réalisée en faisant varier différents paramètres comme le nombre de capteurs ($n \in \{1000, 1500, 2000\}$), le rayon d'émission ($r \in \{1, 1.5, 2, 2.5, 3\}$), le facteur de l'ellipse ($l \in \{1.2, 1.4, 1.6, 1.8, \infty\}$) et la probabilité de relais ($p \in \{0.1, 0.2, \dots, 0.9\}$). La longueur du carré a est fixée à 15.

L'intégralité de leurs résultats de simulations n'est pas présentée ici (pour cela le lecteur est invité à se reporter à (Li et al., 2005)). En revanche, le tableau 7.1 tiré de leur étude, synthétise bien les résultats obtenus.

Facteur de l'ellipse l	Probabilité de relais p	% de capteurs relais
1.2	0.9	15%
1.4	0.8	22%
1.6	0.7	25%
1.8	0.7	30%
∞	0.7	70%

TAB. 7.1: Tableau de synthèse des résultats de simulations obtenus avec $n = 1000$, $r = 1$

Il présente les valeurs du facteur de l'ellipse l et de la probabilité de relais p telles que le pourcentage de capteurs relais soit minimum et que le taux d'acheminement des messages soit supérieur à 99%. Par conséquent, les auteurs arrivent à la conclusion que leur méthode est très efficace lorsque le facteur de l'ellipse est égal à 1.2 et la probabilité de relais est égale à 0.9.

7.1.3 Analyse de ces simulations

Le premier constat que l'on peut faire au regard des résultats du tableau 7.1 est que lorsque le facteur de l'ellipse diminue avec une probabilité de relais qui augmente, le pourcentage de nœuds relais diminue. Il est donc légitime de s'interroger quant aux résultats que l'on obtiendrait si la probabilité de relais était fixée à 1 avec un facteur d'ellipse inférieur à 1.2. Après avoir réalisé les simulations pour répondre à cette question, il convient maintenant d'ajouter une ligne au tableau précédent pour obtenir le tableau 7.2 :

Facteur de l'ellipse l	Probabilité de relais p	% de capteurs relais
1.09	1	13%
1.2	0.9	15%
...

TAB. 7.2: Tableau de synthèse des résultats de simulations obtenus avec $n = 1000$, $r = 1$

Il est donc plus intéressant de considérer tous les capteurs de l'ellipse comme des relais tout en diminuant la taille de cette ellipse.

D'autre part, les auteurs n'utilisent pas de modèle énergétique pour mesurer la quantité d'énergie dépensée ; c'est pourquoi, ils se focalisent sur le pourcentage de nœuds relais et ce quel que soit le rayon d'émission utilisé. Ainsi, le pourcentage de capteurs dépend exclusivement du facteur de l'ellipse et de la probabilité de relais. Or, si un modèle énergétique est utilisé (par exemple celui de (Rodoplu et Meng, 1998a)), le choix

du rayon d'émission a un impact sur la consommation d'énergie (puisque la consommation d'énergie suit une loi de puissance par rapport au rayon d'émission).

Enfin, il est important de souligner que les conclusions qui viennent d'être tirées du tableau 7.1 se généralisent pour un nombre de capteurs et un rayon d'émission différents (cf. (Li et al., 2005)).

La probabilité de relais étant fixée à 1, la problématique revient alors à définir le meilleur couple *rayon d'émission - facteur de l'ellipse* $((r, l))$ pour que la consommation d'énergie pour l'acheminement d'un message soit minimale.

7.2 Calcul du couple *rayon d'émission - facteur de l'ellipse*

En reprenant les résultats précédents, il est possible de déterminer le couple (r, l) optimal du point de vue de la consommation d'énergie.

7.2.1 Calcul analytique

Soit S étant une source expéditrice d'un message à une destination D . Le couple (r, l) doit, dans un premier temps, assurer que le sous graphe défini par l'ellipse est connexe. La fonction *connexe* s'exprime comme suit :

$$\text{connexe}(r, l) = \frac{\ln N + c(N)}{N \cdot \pi (r/a)^2} \quad (7.5)$$

Etant donné que la probabilité de relais est fixée à 1 et de par l'équation 7.4, il faut que $\text{connexe}(r, l) \leq 1$.

Puisque tous les capteurs de l'ellipse sont relais, le nombre de relais est égal à N . Par conséquent, l'énergie consommée lors de l'acheminement d'un message de S à D est donnée par la fonction *energie* définie comme suit :

$$\text{energie}(r, l) = N \cdot J(r) = \frac{n\pi d^2}{4a^2} l \sqrt{l^2 - 1} \cdot (r^4 + 2 \times 10^8) \quad (7.6)$$

Le couple (r, l) sélectionné pour l'acheminement du message de S vers D est tel que la connexité soit garantie ($\text{connexe}(r, l) \leq 1$) et la consommation d'énergie soit minimale ($\min(\text{energie}(r, l))$).

Dans l'exemple analytique qui suit, il est considéré un nombre de capteurs n sélectionné dans l'ensemble $\{500, 750, 1000, 1250, 1500\}$. Pour chacune de ces valeurs est donné le

couple (r, l) tel que la connexité soit assurée et la consommation d'énergie soit minimale dans le cas particulier où $d = \sqrt{2}a$ (i.e la plus grande distance possible entre une source et la destination). Dans la fonction connexe, $c(N)$ est négligé.

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 7.3.

n	r	l
500	130	1.128
750	128	1.07
1000	132	1.037
1250	130	1.026
1500	136	1.015

TAB. 7.3: Résultats analytiques pour $d = \sqrt{2}a$

Ces valeurs sont purement théoriques et ne peuvent en aucun cas être appliquées à des cas concrets puisqu'elles ne prennent pas en compte l'environnement du réseau ($c(N) = 0$) et sont calculées à partir du cas particulier où $d = \sqrt{2}a$. Toutefois, elles donnent un ordre de grandeur pour les valeurs du rayon et du facteur d'ellipse selon le nombre de capteurs présents dans le réseau.

La section suivante présente les résultats des simulations obtenus pour la détermination du couple (r, l) .

7.2.2 Résultats des simulations

Ces simulations ont eu pour but de déterminer le couple (r, l) qui minimise la consommation d'énergie et ce pour chaque configuration du réseau étudiée.

Environnement des simulations

Pour ces simulations, les capteurs sont déployés uniformément dans un carré dont la longueur du côté a est fixée à 2000. Les valeurs du nombre de capteurs n , du rayon d'émission r , ainsi que celles du facteur de l'ellipse l sont résumées dans le tableau 7.4.

Paramètres	Valeurs
a	2000
n	{500, 750, 1000, 1250, 1500}
r	{100, 110, 120, ..., 240, 250}
l	{1.01, 1.02, 1.03, 1.04, 1.05, 1.06, 1.07, 1.08, 1.09, 1.1, 1.15, 1.2, 1.25, 1.3, 1.4, 1.5, 2}

TAB. 7.4: Paramètres de simulation

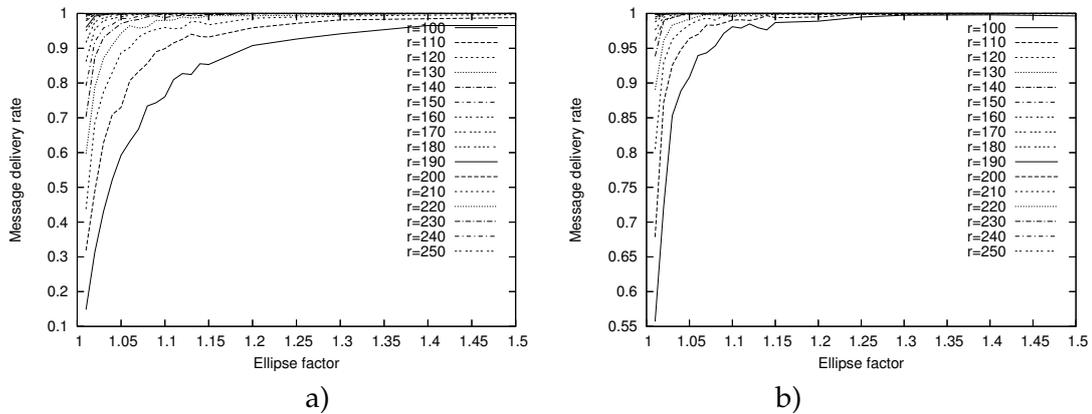


FIG. 7.2: Impacts du paramètre l sur le taux de délivrance des messages pour $n = 1000$ (a) et $n = 1500$ (b)

En considérant les valeurs données par le tableau 7.4 pour le nombre de capteurs et le rayon d'émission, on obtient des densités allant de 3.93 à 73.59.

Le nœud destinataire des messages est sélectionné aléatoirement parmi les n capteurs. Chaque combinaison entre un nombre de capteurs donné, un rayon d'émission donné et un facteur d'ellipse donné correspond à une configuration du réseau. Pour chaque configuration, 10 réseaux sont générés. Pour chacun de ces réseaux, 100 messages sont expédiés successivement à partir de sources sélectionnées uniformément dans le réseau de sorte à obtenir un échantillon représentatif des distances entre les sources et la destination.

Un échantillon de 1000 expéditions est finalement obtenu pour chaque configuration ce qui est suffisant pour valider les résultats de simulations.

Résultats

Les premiers résultats s'intéressent à l'impact du facteur de l'ellipse sur le taux d'acheminement des messages. Les graphes de la figure 7.2 représentent les résultats obtenus pour des rayons d'émission différents dans des réseaux contenant respectivement 1000 (figure 7.2a) et 1500 (figure 7.2b) capteurs.

Il faut constater que lorsque le rayon d'émission est petit, le facteur d'ellipse doit être grand pour assurer un taux d'acheminement supérieur à 99%, mais ce phénomène s'atténue avec un nombre de nœuds plus élevé. Par exemple, pour un rayon d'émission égal à 110, il faudra un facteur d'ellipse supérieur à 1.4 pour des réseaux contenant 1000 nœuds alors qu'un facteur d'ellipse supérieur à 1.09 sera suffisant pour des réseaux contenant 1500 nœuds.

Les résultats suivants s'intéressent à l'impact du facteur de l'ellipse sur la consommation d'énergie. La figure 7.3 comporte deux graphes représentant la consommation

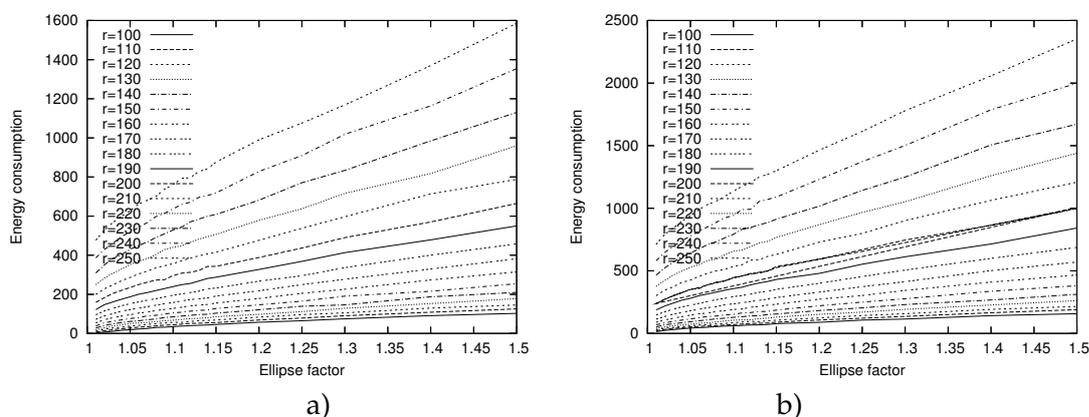


FIG. 7.3: Impacts du paramètre l sur la consommation d'énergie pour $n = 1000$ (a) et $n = 1500$ (b)

d'énergie pour des rayons d'émission différents et pour un nombre de capteurs égal à 1000 pour le premier et 1500 pour le second. Le constat est évident : l'augmentation du rayon d'émission ou du facteur d'ellipse fait augmenter la consommation d'énergie mais à des proportions différentes.

A partir des résultats obtenus pour le taux d'acheminement des messages et la consommation d'énergie, il est possible de définir pour chaque rayon d'émission le facteur d'ellipse qui assure un pourcentage d'arrivée des messages supérieur à 99% tout en minimisant la consommation d'énergie. Par exemple, pour $n = 1000$ et $r = 200$, un tel facteur d'ellipse est de 1.02. Le tableau 7.5 contient les meilleurs facteurs d'ellipse associés à chaque nombre de capteurs et chaque rayon d'émission.

$n \backslash r$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
500	-	-	-	-	-	2	1.5	1.3	1.2	1.15	1.08	1.07	1.06	1.05	1.04	1.03
750	-	-	2	1.4	1.25	1.15	1.09	1.07	1.06	1.04	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02	1.01
1000	-	1.4	1.25	1.13	1.08	1.06	1.05	1.04	1.03	1.02	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01
1250	1.3	1.15	1.11	1.06	1.05	1.04	1.03	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
1500	1.15	1.09	1.05	1.04	1.03	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01

TAB. 7.5: Facteurs d'ellipse assurant plus de 99% d'arrivée des messages et minimisant la consommation d'énergie

Il s'agit maintenant de se focaliser sur la consommation d'énergie en fonction du rayon d'émission. Le graphe de la figure 7.4 est obtenu en sélectionnant comme facteurs d'ellipse les valeurs répertoriées dans le tableau 7.5. Les meilleurs rayons d'émission sont ceux qui fournissent la plus faible consommation d'énergie.

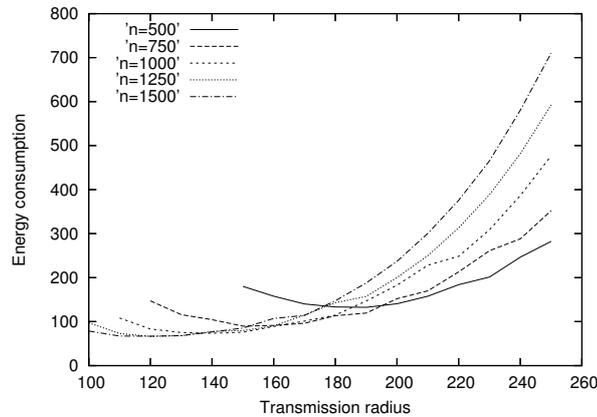


FIG. 7.4: Impacts du rayon d'émission sur la consommation d'énergie

Ainsi, à partir des résultats précédents, il est possible d'identifier les meilleures configurations consommant le moins d'énergie possible tout en assurant l'arrivée des messages. Le tableau 7.6 répertorie l'ensemble des meilleurs couples (r, l) pour chacun des nombres de nœuds étudiés.

n	r	l	Energie ($\cdot 10^9$)
500	180	1.2	133.24
750	160	1.09	91.50
1000	140	1.08	75.75
1250	130	1.06	67.26
1500	120	1.05	60.39

TAB. 7.6: Couples (r, l) définis par simulations

Une remarque reste encore à faire aux vues des résultats du tableau 7.6. En effet, plus le nombre de capteurs présents dans le réseau est important, plus la consommation d'énergie diminue. Pour consommer le moins d'énergie possible, il faudrait choisir le plus petit facteur d'ellipse possible (avec le rayon d'émission adéquat) qui est $l = 1$, ce qui donnerait une ellipse « aplatie » assimilable à un segment de la source à la destination. Or, plus la densité en nœuds augmente, plus il y a de chance que cette ellipse soit connexe (ce qui reviendrait à avoir un ensemble de capteurs en ligne droite de la source à la destination). Donc, plus il y aura de capteurs dans le réseau, plus la consommation d'énergie nécessaire à l'acheminement d'un message tendra vers l'optimal (avec, encore une fois, le rayon d'émission adéquat).

Cette section a permis de mettre en évidence l'impact du rayon d'émission, en fonction

d'un modèle énergétique donné, sur la consommation d'énergie. Le choix du facteur d'ellipse doit quant à lui garantir la connexité de l'ellipse. Dans la suite de l'étude, le tableau 7.6 sert de référence.

7.3 Gestion des erreurs de position

Jusqu'à présent, l'étude s'est basée sur des positions exactes attribuées aux capteurs. Cette section s'intéresse au cas où ces positions sont estimées mais, pour chacune d'elles, une borne de l'erreur de position est connue (ces erreurs peuvent être grandes).

Les erreurs de position introduisent deux problèmes. Le premier est lié à l'approximation de la position de la source. En effet, la localisation de la source étant un paramètre de l'ellipse, une erreur de position la concernant serait génératrice de faux départs et donc de pertes de messages. Le second concerne les capteurs qui, dans certains cas, ne peuvent déterminer avec certitude leur appartenance à l'ellipse et sont donc incapables de déterminer s'ils sont relais ou non. En revanche, ils peuvent, grâce à leurs positions estimées et leurs bornes d'erreurs, calculer une probabilité d'appartenance à cette ellipse.

Dans ce chapitre, les études sont réalisées à partir d'un rayon d'émission sélectionné dans l'ensemble $\{100, 110, \dots, 240, 250\}$. Par souci d'équité dans l'analyse, les erreurs de position sont normalisées à partir du rayon maximal (ici 250) et ce quel que soit le rayon d'émission attribué aux capteurs. Ainsi, il est possible qu'un capteur ait un rayon d'émission plus petit que sa borne d'erreur.

7.3.1 Erreur de position de la source

Si, malgré son erreur de position, la source est assurée d'appartenir à l'ellipse (le cercle, centré en sa position estimée et de rayon sa borne d'erreur, est inclu dans l'ellipse) alors le comportement de l'algorithme reste identique à celui où la source est localisée exactement. Le problème se pose lorsque la source n'est pas assurée d'être dans l'ellipse et c'est ce cas qui est étudié ci-après.

La figure 7.5 illustre le problème engendré par une erreur de position de la source. Soit S la position estimée de la source, ϵ sa borne d'erreur telle que $\epsilon > r$ et S' sa position exacte. L'ellipse est construite à partir de la position S . Or, la position réelle de la source étant en S' , aucun nœud à l'intérieur de l'ellipse ne peut recevoir le message. Ce dernier est alors perdu.

Précédemment, il a été précisé que lorsque les positions des capteurs sont exactes, les voisins directs de la source, qu'ils soient en dedans ou en dehors de l'ellipse, sont relais afin d'éviter les faux départs de messages. Il s'agit bien du même problème lorsque la position de la source est estimée. Soit h le nombre de sauts nécessaire en dessous

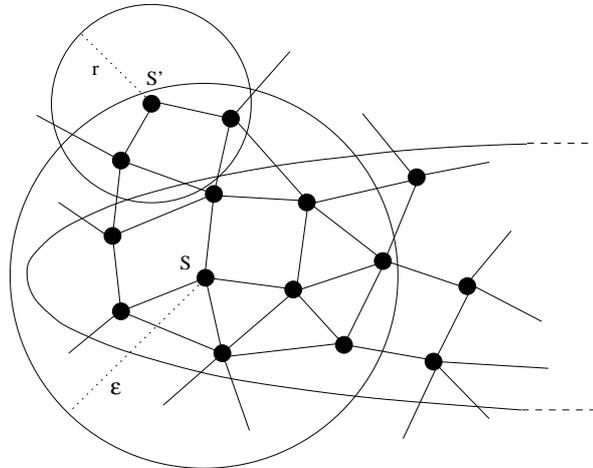


FIG. 7.5: La position de la source est estimée

duquel un capteur devient relais. Alors que h est fixé à 1 lorsque la position de la source est exacte, qu'en est-il de cette valeur lorsque la position est estimée ? En fait, la valeur de h doit assurer qu'au moins un nœud de l'ellipse ait été atteint et que celui-là même n'engendre pas un faux départ du message.

Puisque la source peut être en dehors de l'ellipse, elle doit se fixer une position à atteindre à l'intérieur de celle-ci afin d'assurer la diffusion du message. Or, la seule position (hormis celle de la destination) qui appartient à l'ellipse et dont elle a la connaissance est sa position estimée. Son objectif est donc d'atteindre un nœud à proximité de sa position estimée.

Soit S étant la position estimée de la source, S' sa position exacte et ϵ sa borne d'erreur. Dans le pire cas, S' se situe sur le cercle centré en S et de rayon ϵ . Alors, le nombre de sauts minimum pour atteindre un capteur proche de la position S correspond à la partie entière supérieure de $\frac{\epsilon}{r}$. Pour éviter un faux départ lorsque ce capteur (appartenant à l'ellipse) envoie le message, tous ses voisins deviennent relais. Le nombre de sauts minimum pour h est fixé à :

$$h \geq \left\lceil \frac{\epsilon}{r} \right\rceil + 1 \quad (7.7)$$

Après quelques simulations, il ressort que cette valeur minimale pour h est suffisante pour assurer le départ de la diffusion du message dans l'ellipse et ce quelle que soit la configuration du réseau. Par la suite, cette valeur sera donc utilisée.

7.3.2 Erreurs de position des nœuds restants

Du fait des erreurs de position, il existe des cas où un capteur ne peut déterminer avec certitude son appartenance à une ellipse. En revanche, il peut calculer sa probabi-

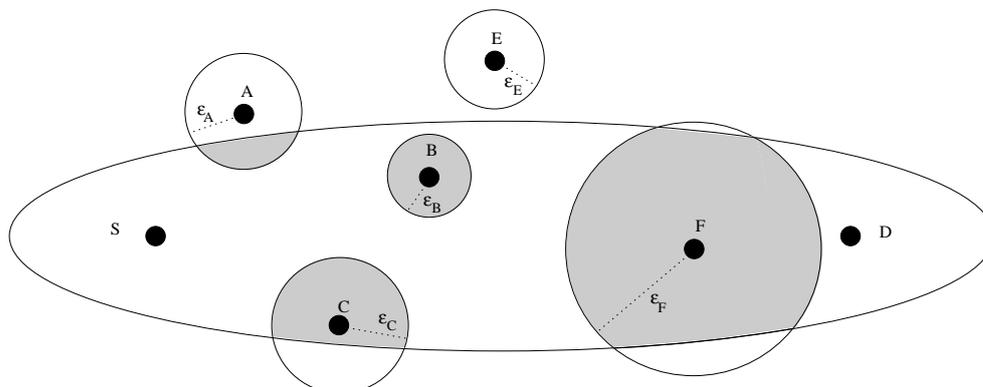


FIG. 7.6: Calcul de la probabilité d'appartenance à l'ellipse

lité d'appartenance à celle-ci. Cette section présente le calcul de cette probabilité.

La figure 7.6 est un exemple de déploiement de capteurs dont les positions sont estimées. Soient S et D étant la source et la destination à partir desquelles l'ellipse est tracée. Les capteurs B et E sont certains d'être respectivement dans et en dehors de l'ellipse malgré leurs erreurs de position. Il n'en est pas de même pour les capteurs A , C et F . Par exemple, en considérant le capteur A , la surface formée par l'intersection de l'ellipse et du cercle centré en A de rayon ϵ_A (en gris sur la figure), représente toutes les positions possibles où A serait à l'intérieur de l'ellipse. Il en est de même pour les capteurs C et F .

Le calcul de la probabilité d'appartenance à l'ellipse se ramène donc à un simple rapport de surfaces. Soit X un capteur, ϵ_X sa borne d'erreur de position et S_X l'aire de l'intersection entre l'ellipse et le cercle centré en X de rayon ϵ_X . La probabilité p que le capteur X appartienne à l'ellipse est donnée par :

$$p = \frac{S_X}{\pi\epsilon_X^2} \quad (7.8)$$

Il reste maintenant à définir comment calculer la surface S_X .

Tout d'abord, rappelons l'équation d'un cercle :

$$x^2 + y^2 = r \quad (7.9)$$

L'équation d'une ellipse, dont la source et la destination sont séparées d'une distance d , est la suivante :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \text{ avec } a = ld \text{ et } b = \frac{d\sqrt{l^2 - 1}}{2} \quad (7.10)$$

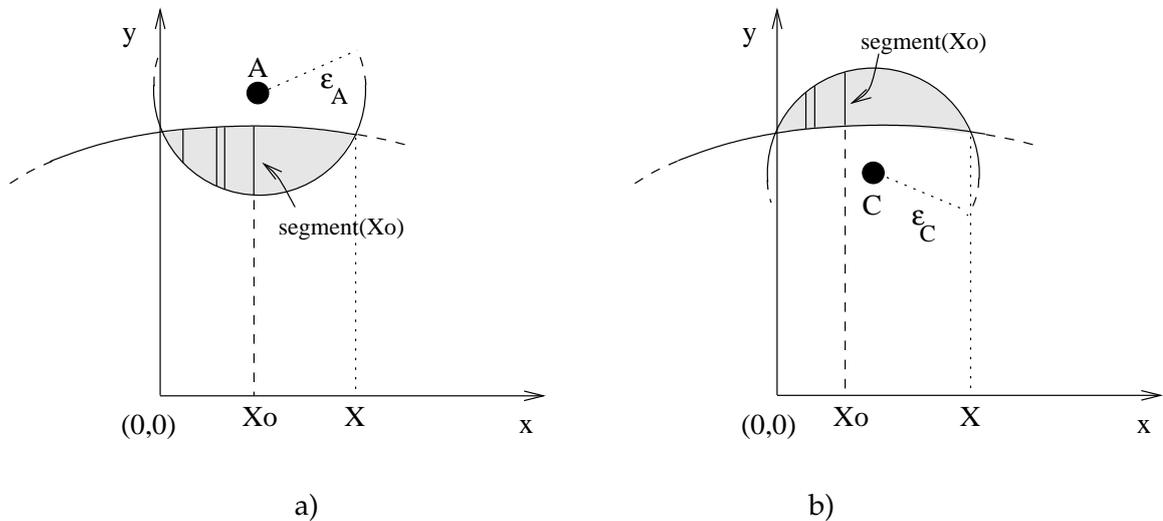


FIG. 7.7: Calcul de la surface

Il est nécessaire ensuite de calculer les points d'intersection entre le cercle et l'ellipse. Or, comme le montre la figure 7.6 avec le capteur F , il peut y avoir au plus quatre points d'intersection. En fait, obtenir ces points revient à trouver les racines d'un polynôme de degré quatre, par exemple en utilisant la méthode de Ferrari (L.Ferrari).

Le calcul de la surface consiste à traiter les trois configurations suivantes. Considérons un capteur tel que le cercle centré en sa position estimée et de rayon sa borne d'erreur a :

1. deux points d'intersection avec l'ellipse et sa position estimée n'appartient pas à l'ellipse (le capteur A dans la figure 7.6) ;
2. deux points d'intersection avec l'ellipse et sa position estimée appartient à l'ellipse (le capteur C dans la figure 7.6) ;
3. quatre points d'intersection avec l'ellipse (le capteur F dans la figure 7.6).

Dans le premier cas, la surface sera directement calculée. Dans le second, la surface correspondant à l'ensemble des points en dehors de l'ellipse sera calculée puis soustraite à la surface totale du cercle afin d'obtenir la surface souhaitée. Enfin, la troisième configuration est un cas particulier de la seconde : les deux surfaces en dehors de l'ellipse seront calculées puis soustraites à la surface totale du cercle.

La figure 7.7 illustre les deux premiers cas (les capteurs A et C dans la figure 7.6) : le premier en 7.7a et le second en 7.7b. Les explications qui suivent s'appuient sur cette figure et présentent la technique de calcul de la surface définie par l'intersection d'une ellipse et d'un cercle.

La distance entre les deux points d'intersection est notée X . Quitte à effectuer les rotations et les translations nécessaires, la situation étudiée est projetée sur un repère orthogonal de sorte à faire correspondre l'abscisse du premier point d'intersection en 0 et le second en X .

Dans le calcul, le domaine de définition de x se restreint à $[0, X]$. Dans le cas où la position estimée n'appartient pas à l'ellipse (le capteur A), le domaine de définition de y est $[y_A - \epsilon, y_A]$. Lorsque la position estimée est à l'intérieur de l'ellipse (le capteur C), le domaine de définition de y est $[y_C, y_C + \epsilon]$.

A chaque valeur de x sur l'intervalle $[0, X]$ correspond un point sur l'ellipse et un point sur le cercle. Les fonctions $\mathcal{C}(x)$ et $\mathcal{E}(x)$, déduites des équations du cercle et de l'ellipse données en (7.15) et (7.10), retournent l'ordonnée du point d'abscisse x appartenant respectivement au cercle et à l'ellipse.

La fonction $segment(x)$ retourne la distance séparant les deux points de coordonnées respectives $(x, \mathcal{C}(x))$ et $(x, \mathcal{E}(x))$ et s'exprime comme suit :

$$segment(x) = |\mathcal{E}(x) - \mathcal{C}(x)| \quad (7.11)$$

La somme des segments obtenus à partir des abscisses sur l'intervalle $[0, X]$ représente la surface grisée, noté S' , qui se définit comme suit :

$$S' = \int_0^X segment(x) dx \quad (7.12)$$

Ainsi, dans la première configuration, la surface S_A est donnée par :

$$S_A = S' \quad (7.13)$$

et dans la seconde configuration, la surface S_C est donnée par :

$$S_C = \pi\epsilon_C^2 - S' \quad (7.14)$$

Enfin, le cercle de centre le capteur F et de rayon ϵ_F présente deux surfaces S_1 et S_2 hors de l'ellipse. Ces deux surfaces sont calculées de la même manière que dans le second cas, puis S_F est obtenue comme suit :

$$S_F = \pi\epsilon_F^2 - S_1 - S_2 \quad (7.15)$$

Maintenant que le calcul de la probabilité d'appartenance à une ellipse est connu, il s'agit de définir une valeur de probabilité seuil au dessus de laquelle le capteur devient relais du message. Les valeurs seuil sont par la suite déterminées par des simulations.

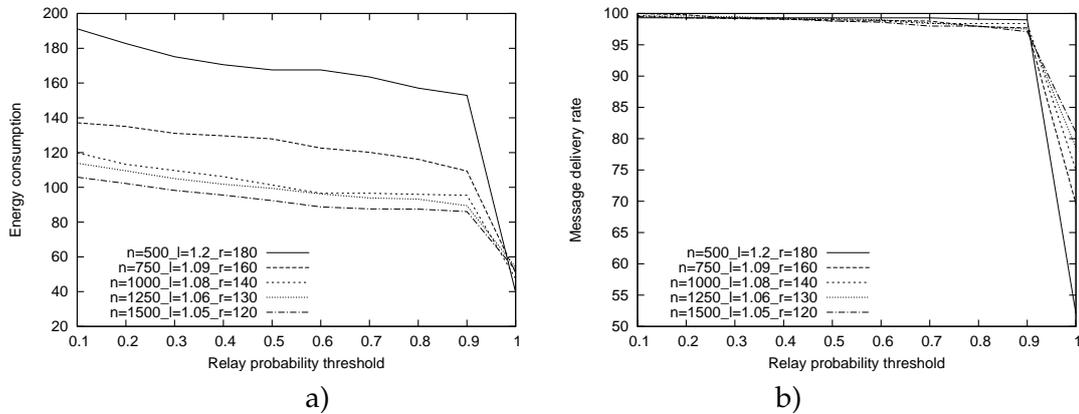


FIG. 7.8: Impacts de la probabilité de relais sur la consommation d'énergie (a) et sur le taux d'acheminement des messages (b)

7.3.3 Résultats des simulations

Il s'agit dans cette section d'analyser les résultats de simulations obtenus lorsque la méthode prend en compte les erreurs de position des capteurs. Une fois qu'un capteur a calculé sa probabilité d'appartenance à une ellipse, il décide de faire suivre un message si la valeur de sa probabilité est au dessus d'un certain seuil. Les résultats suivants définissent les seuils adéquats selon les différentes configurations du réseau.

Les deux graphes de la figure 7.8 s'intéressent à la consommation d'énergie dépensée pour le premier et au taux d'acheminement des messages pour le second, en faisant dans les deux cas varier la valeur du seuil p_{seuil} de la probabilité au dessus de laquelle un capteur fait suivre un message. Chacun de ces graphes contient cinq courbes représentant des réseaux avec un nombre de nœuds respectivement égal à 500, 750, 1000, 1250 et 1500. Pour chacune de ces valeurs, les meilleurs couples (r, l) , déterminés dans les simulations précédentes, sont utilisés.

Comme on pouvait s'y attendre, le choix d'une faible valeur du seuil (proche de 0), qui favorise de fait les capteurs à devenir relais, assure un taux d'acheminement des messages supérieur à 99% mais augmente la consommation d'énergie. A l'inverse, une valeur de seuil trop élevée (proche de 1) réduit évidemment la consommation d'énergie, et pour cause, puisque le taux d'acheminement des messages chute. Cette remarque est valable quelle que soit la configuration du réseau. Il s'agit donc de définir la valeur du seuil pour laquelle le taux d'acheminement des messages reste supérieur à 99% tout en ayant la plus basse consommation d'énergie.

Le tableau 7.7, obtenu à partir des résultats des courbes de la figure 7.8, contient pour chaque configuration la meilleure valeur du seuil au-dessus de laquelle un capteur devient relais.

n	r	l	p_{seuil}	Energie ($\cdot 10^9$)
500	180	1.2	0.9	152.9
750	160	1.09	0.7	120.18
1000	140	1.08	0.6	96.62
1250	130	1.06	0.6	96.25
1500	120	1.05	0.5	92.35

TAB. 7.7: Valeurs du seuil selon les configurations

Au regard du tableau, il semble qu'il y ait un lien entre la valeur du facteur de l'ellipse et la valeur du seuil. En effet, le calcul de la probabilité dépend de la borne d'erreur de position d'un capteur et indirectement du facteur de l'ellipse (qui définit la taille de l'ellipse). Or, quelle que soit la valeur de ce facteur, la borne d'erreur est toujours normalisée par rapport au rayon d'émission maximal des capteurs. Donc, dans le calcul, plus une ellipse est petite, plus les chances pour un capteur d'être en dehors augmentent. C'est ce qui semble expliquer ce phénomène.

Enfin, la comparaison de ces résultats à ceux obtenus avec des capteurs localisés exactement fait ressortir que les erreurs de position ont un impact important au regard des deux critères d'analyse que sont le taux d'acheminement des messages et la consommation d'énergie. C'est pourquoi, il est essentiel d'intégrer ces erreurs dans les études des techniques de routage géographique.

7.4 Conclusion

Le problème du routage dans les réseaux de capteurs mobiles a été plus étudié que celui de la localisation mais jamais en considérant des capteurs dont les positions ne sont pas exactes (ou sont faiblement perturbées). Ce chapitre présente la méthode Ellipse-Routing qui est d'abord étudiée dans des réseaux où les positions des capteurs sont exactes puis estimées en y associant leurs bornes d'erreurs de position (pouvant être grandes). Cette méthode est adaptée à la mobilité des capteurs puisqu'ils ne nécessitent d'aucune information relative à leurs voisinages, ce qui évite des échanges de messages consommateurs d'énergie.

Reste une amélioration à apporter à cette méthode à savoir déterminer une stratégie de diffusion à l'intérieur de l'ellipse afin de réduire la consommation d'énergie. Pour maintenir les avantages d'Ellipse-Routing, cette stratégie devra s'appuyer sur les mêmes données (un capteur connaît sa position, celle de la source et celle de la destination). Nous avons entamé un travail sur la diffusion dans les réseaux de capteurs statiques ou mobiles où les capteurs ont seulement besoin de connaître leurs positions

et celle de la source. Après avoir validé cette méthode, il faudra vérifier si elle peut s'appliquer à l'intérieur de l'ellipse.

Chapitre 8

Conclusion et perspectives

8.1 Conclusion

Quel que soit le domaine d'étude considéré, jamais une avancée technologique ou scientifique ne s'est faite sans difficulté. Les réseaux de capteurs ne dérogent pas à cette règle et un certain nombre de problématiques doit être résolu avant de voir apparaître un monde « tous capteurs ».

Cette thèse s'est attachée à apporter quelques contributions à ce vaste champ d'étude que nous ouvrent les réseaux de capteurs. En fonction des contraintes liées à ces réseaux, chacune s'est efforcée de faire émerger un comportement cohérent au travers de l'algorithmique distribuée tout en maintenant l'objectif de réduire la consommation d'énergie.

Même s'il n'y a pas de hiérarchisation à faire entre les problèmes liés à ces réseaux, force est de constater que la résolution de bon nombre d'entre eux se verrait facilitée si les positions géographiques des capteurs étaient connues. De cette assertion s'est naturellement dégagée la première orientation de cette thèse à savoir le problème de la localisation. Les précisions des méthodes existantes étant insuffisantes, cette contribution a eu pour objectifs de proposer des techniques qui, à défaut de pouvoir localiser précisément tous les capteurs, attribuent des positions exactes ou estimées en y associant, le cas échéant, leurs bornes d'erreurs de position et contribuer ainsi à la localisation. Ouvertes aux technologies permettant à un capteur de mesurer les distances ou les angles qu'il forme avec ses voisins, les méthodes ont eu à gérer l'introduction d'erreurs de mesure qui constitue le principal inconvénient de ces technologies. Le fait que les capteurs connaissent la précision de leurs positions et leur capacité à éliminer des informations de localisation incohérentes (erreurs de mesure ou erreurs de position) constituent les points forts de ces méthodes de localisation.

Pour les réseaux de capteurs statiques, l'étude s'est principalement focalisée sur la précision des positions attribuées aux capteurs. A partir d'hypothèses identiques, les résultats obtenus par simulations démontrent la supériorité des techniques de localisation

proposées en comparaison aux méthodes existantes. Bien que la plupart des travaux se basent sur ces mêmes hypothèses, il a été néanmoins indispensable de les discuter afin de juger de leurs crédibilités et, lorsqu'elles ne l'étaient pas, d'étudier comment les rendre applicables.

L'étude du problème de la localisation dans les réseaux de capteurs mobiles est en soi une avancée puisqu'aucun travail ne l'avait abordé auparavant, en tout cas pas directement. Il s'agit là d'un premier travail qui met en exergue les difficultés qu'entraîne la mobilité des capteurs sur l'estimation des positions. Ce travail a le mérite de fixer un cadre d'étude qui pourra constituer une base pour des travaux futurs.

Après la localisation, cette thèse s'est intéressée au problème du routage dans les réseaux de capteurs. Non sans lien avec la première partie, et à contre-pied de tous les algorithmes de routage géographique proposés à ce jour, les méthodes présentées se sont appuyées non pas sur des positions exactes des capteurs mais sur des positions estimées avec la connaissance des bornes d'erreurs associées. Leur objectif commun a été de maximiser le taux d'acheminement des messages tout en minimisant la consommation d'énergie.

Dans le cadre des réseaux statiques, un modèle probabiliste a été élaboré afin de représenter l'incertitude de l'existence des liens de communication entre capteurs due aux imprécisions des positions. Dans la technique proposée, les probabilités sont susceptibles d'être corrigées au fur et à mesure que des messages sont échangés. Cette étude a également introduit la notion de rayon de transmission optimal en termes d'avancée du message. Cet élément clé pourra être repris dans les travaux futurs à chaque fois que le progrès d'un message sera considéré.

La mobilité des capteurs entraîne un changement du référentiel de données sur lequel repose la stratégie de routage. En effet, les liens étant dynamiques, il est préférable que les capteurs ne basent pas leurs raisonnements sur des informations relatives à leurs voisinages car cela nécessiterait des communications consommatrices en énergie. Cette étude a consisté à proposer une solution telle que la connaissance d'un capteur se résume à sa position, celle de la source du message et celle de la destination. En s'inscrivant dans la même logique que pour la localisation, elle a considéré des capteurs dont les positions sont estimées.

Cette thèse s'est voulue constructive et objective en soulignant les points forts sans oublier les faiblesses des méthodes proposées. Elle s'est surtout voulue utile en remplissant l'objectif qui lui était fixé en apportant *quelques contributions dans les réseaux de capteurs...*

8.2 Perspectives

Comme bien souvent, les travaux présentés dans cette thèse ouvrent de nouvelles perspectives à court, moyen et long termes.

Nous élaborons actuellement une technique de diffusion adaptée aux réseaux mobiles où les capteurs ont seulement besoin de connaître leurs positions et celle de la source pour décider s'ils sont relais ou non du message. La notion de rayon optimal, introduite au cours de cette thèse, sera utilisée dans cette technique mais en termes de recouvrement de surface. Une fois défini et validé, ce travail pourra être repris dans le cadre de la diffusion à l'intérieur de l'ellipse de la méthode Ellipse-Routing.

D'autre part, la gestion des boucles de l'algorithme de routage EEG-Routing reste à améliorer. En effet, celle proposée, efficace en termes de consommation d'énergie, est rigide et peut parfois entraîner la perte d'un message. Une autre solution garantissant l'arrivée des messages a été envisagée mais finalement écartée car pouvant être désastreuse du point de vue de la consommation d'énergie. Suite à ces deux premières propositions, il serait intéressant de travailler à l'élaboration d'une solution qui reprendrait les avantages de chacune.

Il existe deux possibilités pour valider les méthodes proposées dans le domaine des réseaux de capteurs. La première consiste à simuler ces méthodes en essayant de modéliser au mieux les caractéristiques de ces réseaux (rayon d'émission, consommation d'énergie, ...) pour tenter de se ramener aux conditions réelles d'un déploiement de capteurs. Or, l'environnement du réseau (climat, obstacles, degré d'humidité, ...) joue un rôle prépondérant sur l'ensemble de ces caractéristiques et aucune modélisation n'est capable de reproduire ces contraintes (notamment pour le problème de la localisation). La solution idéale reste donc d'expérimenter ces méthodes sur une plate-forme réelle de capteurs. Nous nous sommes récemment dotés d'une petite plate-forme de 50 capteurs sur laquelle nous comptons implémenter les différentes méthodes décrites dans cette thèse, en prenant garde toutefois au fait que la condition du passage à l'échelle ne sera pas validée. Ce ne sera qu'en effectuant une combinaison entre les résultats de simulations et ceux d'expérimentations que l'on pourra valider ou invalider ces méthodes.

Enfin, le lecteur l'aura compris, nos travaux n'ont eu de cesse de refuser l'hypothèse de la connaissance des positions exactes des capteurs. Il s'agira de les poursuivre dans le même état d'esprit en abordant les problèmes restants (comme par exemple celui de la diffusion ou du multicast) en considérant des positions estimées avec la connaissance des bornes d'erreurs de position associées.

Liste des illustrations

1.1	Architecture d'un capteur	2
1.2	Exemple de capteur	3
2.1	Principe des méthodes de localisation par satellite (en 2D)	10
2.2	DV-Hop	14
2.3	SumDist	16
2.4	MinMax	17
2.5	Euclidean	17
2.6	APS avec AoA	18
2.7	a) La triangulation b) Calcul de la position	19
3.1	Approximation de la position du capteur X dans AT-Free	24
3.2	Approximation de la position du capteur X dans AT-Dist	28
3.3	La position réelle de X est en A ou en A'	29
3.4	Règle 1	30
3.5	Règle 2	31
3.6	Règle 3	32
3.7	Efficacité de la règle 2	32
3.8	Défaut de la multilatération	33
3.9	Erreurs de mesure dans SumDist	33
3.10	Calcul d'un angle	35
3.11	a) Z déduit son côté b) Z ne déduit rien	37
3.12	Approximation avec : a) cercles b) droites c) les deux	38
3.13	Représentation du réseau par une grille	40
3.14	Exemple de perturbations sur l'émission radio	41
3.15	Extension de la règle 1 à la troisième dimension	43
3.16	Taux de l'erreur moyenne de position	46
3.17	Pourcentage de nœuds bien localisés	46
3.18	Comportement de l'erreur moyenne de position en fonction de la densité du réseau	46
3.19	APS avec ou sans AT-Free	47
3.20	SumDistMinMax avec ou sans AT-Free	47
3.21	AT-Dist : impact du seuil <i>confidence</i>	48
3.22	AT-Angle : impact du seuil <i>confidence</i>	48
3.23	AT-Dist : taux de l'erreur moyenne	49

3.24	AT-Angle : taux de l'erreur moyenne	49
3.25	AT-Dist et AT-Angle : pourcentage de nœuds localisés avec une erreur de position inférieure à 20% avec $\delta = 0\%$	49
3.26	AT-Dist : impact de la densité	50
3.27	AT-Angle : impact de la densité	50
3.28	AT-Dist : impact des erreurs de distance	50
3.29	AT-Angle : impact des erreurs d'angle	50
3.30	Ajout d'ancres dans le réseau avec la méthode MuR, pour $\delta = 0, 5, 10\%$	51
4.1	SFR	56
4.2	DVM	57
4.3	MADRDR	58
4.4	Estimation de la position de X	60
4.5	Règle 2 où X connaît les positions de B et C	60
4.6	Estimation de la position de X	61
4.7	Estimation de la position de X	62
4.8	Discrétisation du réseau	63
4.9	Performances de SFR, DVM et MADRD dans les configurations $\langle M, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$ sans erreur de mesure (a,b,c) et avec 5% d'erreurs de mesure (d,e,f) pour chacune des méthodes d'ATM-Family	71
4.10	Performances de SFR, DVM et MADRD dans les configurations $\langle M, S, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$ sans erreur de mesure (a,b,c) et avec 5% d'erreurs de mesure (d,e,f) pour chacune des méthodes d'ATM-Family	72
4.11	Performances de SFR dans les configurations $\langle S, M, \{\emptyset, dist, angle\} \rangle$ sans erreur de mesure (a) et avec 5% d'erreurs de mesure (b) pour chacune des méthodes d'ATM-Family	73
5.1	Transmission d'un message vers la station de base lors de la détection d'un événement	79
5.2	Stratégie de routage pour les méthodes MFR, Greedy Routing et Compass routing	83
6.1	Exemple de déploiement	88
6.2	$E(d)$ en fonction du rayon d'émission d	89
6.3	B est localisé exactement tandis que A non (i.e. $\epsilon_A > 0$ et $\epsilon_B = 0$)	91
6.4	A et B ont des positions estimées (i.e. $\epsilon_A > 0$ et $\epsilon_B > 0$)	92
6.5	Explication du calcul de la probabilité p_2	93
6.6	Exemple d'un réseau avant déploiement	97
6.7	Impacts du paramètre α sur : a) le taux de délivrance des messages b) la consommation d'énergie	100
6.8	Impacts de la densité du réseau sur la consommation de l'énergie	101
7.1	Exemple d'une ellipse pour l'acheminement d'un message d'une source vers une destination	104
7.2	Impacts du paramètre l sur le taux de délivrance des messages pour $n = 1000$ (a) et $n = 1500$ (b)	109

7.3	Impacts du paramètre l sur la consommation d'énergie pour $n = 1000$ (a) et $n = 1500$ (b)	110
7.4	Impacts du rayon d'émission sur la consommation d'énergie	111
7.5	La position de la source est estimée	113
7.6	Calcul de la probabilité d'appartenance à l'ellipse	114
7.7	Calcul de la surface	115
7.8	Impacts de la probabilité de relais sur la consommation d'énergie (a) et sur le taux d'acheminement des messages (b)	117

Liste des tableaux

4.1	Classement des stratégies d'ordonnancement avec ou sans erreur de mesure pour chacune des méthodes d'ATM-Family	67
6.1	Tables de coûts des capteurs avant et après déploiement pour l'exemple de la figure 6.6	97
6.2	Meilleures valeurs du paramètre α en fonction de la densité	101
7.1	Tableau de synthèse des résultats de simulations obtenus avec $n = 1000$, $r = 1$	106
7.2	Tableau de synthèse des résultats de simulations obtenus avec $n = 1000$, $r = 1$	106
7.3	Résultats analytiques pour $d = \sqrt{2}a$	108
7.4	Paramètres de simulation	108
7.5	Facteurs d'ellipse assurant plus de 99% d'arrivée des messages et minimisant la consommation d'énergie	110
7.6	Couples (r, l) définis par simulations	111
7.7	Valeurs du seuil selon les configurations	118

Bibliographie

- (Akyildiz et al., 2002) I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, et E. Cayirci, 2002. Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks (Amsterdam, Netherlands : 1999)*.
- (Bahl et Padmanabhan, 2000) P. Bahl et V. N. Padmanabhan, 2000. Radar : An in-building rf-based user location and tracking system. *INFOCOM*.
- (Barbeau et al., 2004) M. Barbeau, E. Kranakis, D. Krizanc, et P. Morin, 2004. Improving distance based geographic location techniques in sensor networking. *3rd International Conference on AD-HOC Networks & Wireless*.
- (Barrière et al., 2001) L. Barrière, P. Fraigniaud, et L. Narayanan, 2001. Robust position-based routing in wireless ad hoc networks with unstable transmission ranges. Dans les actes de *DIALM '01 : Proceedings of the 5th international workshop on Discrete algorithms and methods for mobile computing and communications*, New York, NY, USA, 19–27. ACM Press.
- (Basagni et al., 2006) S. Basagni, M. Battelli, M. Iachizzi, C. Petrioli, et M. Salehi, 2006. Limiting the propagation of localization errors in multi-hop wireless networks. Dans les actes de *PERCOMW '06 : Proceedings of the 4th annual IEEE international conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- (Benbadis et al., 2005) F. Benbadis, T. Friedman, M. D. de Amorim, et S. Fdida, 2005. Gps-free-free positioning system for wireless sensor networks. *Second IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks WOCN, Dubai, United Arab Emirates UAE*.
- (Benslimane et Bachir, 2003) A. Benslimane et A. Bachir, 2003. Inter-vehicle geocast-protocol supporting non equipped gps vehicles. *in : LNCS 2865 ADHOC-NOW 03 Int. Conference on Ad-Hoc, Mobile and Wireless Networks, Montréal, Canada, Springer Publisher, pp. 281-286..*
- (Bergamo et Mazzini, 2002) P. Bergamo et G. Mazzini, 2002. Localisation in sensor networks with fading and mobility. *IEEE PIMRC*.
- (Bondy et Murty, 1976) J. Bondy et U. Murty, 1976. Graph theory with applications. *Elsevier North-Holland*.

- (BonnMotion, 2002) BonnMotion, 2002. <http://web.informatik.uni-bonn.de/iv/mitarbeiter/dewaal/bonnmotion/>.
- (Bose et al., 2001) P. Bose, P. Morin, I. Stojmenovic, et J. Urrutia, 2001. Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks. *Wireless Networks*, 609–616.
- (Boushaba et al., 2007) M. Boushaba, A. Benslimane, et A. Hafid, 2007. 2l : Angle to landmarks based method positioning for wireless sensor networks. *IEEE International Conference on Communications (ICC 2007), Glasgow, Scotland, UK*.
- (Bulusu et al., 2000) N. Bulusu, J. Heidemann, et D. Estrin, 2000. Gps-less low cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications Magazine*.
- (Bulusu et al., 2001) N. Bulusu, J. Heidemann, et D. Estrin, 2001. Adaptive beacon placement. *The Twenty First International Conference on Distributed Computing Systems, Phoenix*.
- (Camp et al., 2002) T. Camp, J. Boleng, et V. Davies, 2002. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC) : Special issue on Mobile Ad Hoc Networking : Research, Trend and Applications*.
- (Cartigny et al., 2003) J. Cartigny, D. Simplot, et I. Stojmenović, 2003. Localized minimum-energy broadcasting in ad-hoc networks. *INFOCOM'03*.
- (Cartigny et al., 2004) J. Cartigny, D. Simplot-Ryl, et I. Stojmenovic, 2004. An adaptive localized scheme for energy-efficient broadcasting in ad hoc networks with directional antennas. *In Proc. 9th IFIP International Conference on Personal Wireless Communications*.
- (Caruso et al., 2005) A. Caruso, S. Chessa, S. De, et A. Urpi, 2005. Gps free clustering assignment and routing in wireless sensor networks.
- (Champ et Saad, 2007) J. Champ et C. Saad, 2007. Un nouvel algorithme de routage géographique dans les réseaux de capteurs. *MAJECSTIC'07, Caen, France*.
- (Champ et Saad, 2008) J. Champ et C. Saad, 2008. An energy-efficient geographic routing with location errors in wireless sensor networks. *The International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks (I-SPAN)*.
- (Chan et al., 2005) H. Chan, M. Luk, et A. Perrig, 2005. Using clustering information for sensor network localization. *In The International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS 2005)*.
- (Chandrasekhar et al., 2006) V. Chandrasekhar, W. K. Seah, Y. S. Choo, et H. V. Ee, 2006. Localization in underwater sensor networks : survey and challenges. Dans les actes de *WUWNet '06 : Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks*, New York, NY, USA, 33–40. ACM Press.
- (Chen et al., 2006) X. Chen, Minand Wang, V. C. Leung, et Y. Yuan, 2006. Virtual coordinates based routing in wireless sensor networks. Dans les actes de *Sensor Letters, Volume 4, Number 3*, pp. 325-330(6).

- (Chen et Liestman, 2002) Y. P. Chen et A. L. Liestman, 2002. Approximating minimum size weakly-connected dominating sets for clustering mobile ad hoc networks. *In Proc. of the Symp. on Mobile ad hoc networking and computing.*
- (Clausen et Jacquet, 2003) T. Clausen et P. Jacquet, 2003. Optimized link state routing protocol (olsr). *RFC 3626, IETF Network Working Group.*
- (CNES et ESA,) CNES et ESA. The galileo project. <http://www.cnes.fr/html/4554711679.php>.
- (Crossbow,) Crossbow. Inc. Dans les actes de <http://www.xbow.com>.
- (Datta et al., 2006) S. Datta, C. Klinowski, M. Rudafshani, et S. Khaleque, 2006. Distributed localization in static and mobile sensor networks. *2nd IEEE International conference on wireless and mobile computing, networking and communications (WiMob).*
- (Doherty, 2000) L. Doherty, 2000. Algorithms for position and data recovery in wireless sensor networks. *Master's Report, University of California, Berkeley.*
- (Elhafsi et al., 2007) E. H. Elhafsi, Nathalie, et D. Simplot-Ryl, 2007. Cost over progress based energy-efficient routing protocol over virtual coordinates in wireless sensor networks. Dans les actes de *T2PWSN'07, Helsinki, Finland.*
- (Feeney, 2001a) L. M. Feeney, 2001a. An energy consumption model for performance analysis of routing protocols for mobile ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications.*
- (Feeney, 2001b) L. M. Feeney, 2001b. An energy consumption model for performance analysis of routing protocols for mobile ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications, 239–249.*
- (Finn, 1987) G. Finn, 1987. Routing and addressing problems in large metropolitan-scale internetworks. Rapport technique ISI/RR-87-180, University of Southern California, Marina del Rey : Information Sciences Institute.
- (Frey et Stojmenovic, 2006) H. Frey et I. Stojmenovic, 2006. On delivery guarantees of face and combined greedy-face routing in ad hoc and sensor networks. Dans les actes de *MobiCom '06 : Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, New York, NY, USA, 390–401. ACM Press.
- (Gabriel et Sokal, 1969) K. Gabriel et R. Sokal, 1969. A new statistical approach to geographic variation analysis. *Systematic Zoology 18, 259–278.*
- (Gupta et Kumar, 1998) P. Gupta et P. R. Kumar, 1998. Critical power for asymptotic connectivity in wireless networks. *Stochastic Analysis, Control, Optimization and Applications : A Volume in Honor of W. H. Fleming, W. M. McEneaney, G. Yin, and Q. Zhang (Eds.).*
- (Hass et al., 2002) Z. Hass, J. Halpern, et L. Li, 2002. Gossip-based ad hoc routing. *IEEE INFOCOM.*

- (He et al., 2003) T. He, C. Huang, B. Blum, J. Stankovic, et T. Abdelzaher, 2003. Range-free localization schemes in large scale sensor networks. *MobiCom*.
- (He et al., 2005) T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, et T. Abdelzaher, 2005. Range-free localization and its impact on large scale sensor networks. *IEEE Personal Communications Magazine*.
- (Hightower et Borriello, 2001) J. Hightower et G. Borriello, 2001. Location systems for ubiquitous computing. *IEEE Computer* 34(8) pp. 57-66.
- (Hou et Li, 1986) T. Hou et V. Li, 1986. Transmission range control in multihop packet radio networks. *IEEE Transactions on Communications*, 38-44.
- (IAC,) T. I.-A. C. IAC. Glonass. <http://www.glonass-ianc.rsa.ru>.
- (Ingelrest et Simplot-Ryl, 2004) F. Ingelrest et D. Simplot-Ryl, 2004. Localized broadcast incremental power protocol for wireless ad hoc networks. *In Proc. 9th IFIP International Conference on Personal Wireless Communications*.
- (Ingelrest et al., 2005) F. Ingelrest, D. Simplot-Ryl, et I. Stojmenovic, 2005. Energy efficient broadcasting in wireless mobile networks. *In Resource Management in Wireless Networking, M. Cardei, I. Cardei, and D.-Z. Du, Eds, Kluwer*.
- (Ji et Zha, 2004) X. Ji et H. Zha, 2004. Sensor positioning in wireless ad-hoc sensor networks using multidimensional scaling. *INFOCOM'04*.
- (Johnson et Maltz, 1996) D. B. Johnson et D. A. Maltz, 1996. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. *Mobile Computing, Imielinski and Korth, Eds., vol. 353. Kluwer Academic Publishers*.
- (K. et P., 2002) P. K. et K. P., 2002. Principles of wireless networks. *Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey*.
- (Karp et Kung, 2000) B. Karp et H. T. Kung, 2000. Gpsr : greedy perimeter stateless routing for wireless networks. Dans les actes de *MobiCom '00 : Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, New York, NY, USA, 243-254. ACM Press.
- (Kim et al., 2005) Y.-J. Kim, R. Govindan, B. Karp, et S. Shenker, 2005. On the pitfalls of geographic face routing. Dans les actes de *DIALM-POMC '05 : Proceedings of the 2005 joint workshop on Foundations of mobile computing*, New York, NY, USA, 34-43. ACM Press.
- (Ko et Vaidya, 1998) Y.-B. Ko et N. H. Vaidya, 1998. Location-aided routing (lar) in mobile ad hoc networks. *in Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom)*, pp. 66-75.
- (Kranakis et al., 1999) E. Kranakis, H. Singh, et J. Urrutia, 1999. Compass routing on geometric networks. Dans les actes de *Proc. 11 th Canadian Conference on Computational Geometry*, Vancouver, 51-54.

- (Kuhn et al., 2003) F. Kuhn, R. Wattenhofer, et A. Zollinger, 2003. Worst-case optimal and average-case efficient geometric ad-hoc routing. Dans les actes de *Proc. 4th ACM Int. Symposium on Mobile Ad-Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*.
- (Kuruwila et al., 2006) J. Kuruwila, A. Nayak, et I. Stojmenovic, 2006. Progress based localized power and cost aware routing algorithms for ad hoc and sensor wireless networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 147–159.
- (Langendoen et Reijers, 2003) K. Langendoen et N. Reijers, 2003. Distributed localization in wireless networks : A quantitative comparison. *Computer Networks*, no 43, pp. 500-518.
- (L.Ferrari,) L.Ferrari. http://fr.wikipedia.org/wiki/méthode_de_ferrari.
- (Li et al., 2000) J. Li, J. Jannotti, D. S. J. D. Couto, D. R. Karger, et R. Morris, 2000. A scalable location service for geographic ad hoc routing. *Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00)*, pp. 120-130.
- (Li et al., 2005) X.-Y. Li, K. Moaveninejad, et O. Frieder, 2005. Regional gossip routing for wireless ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications*, 61 – 77.
- (Liu et al., 2005a) B. Liu, P. Brass, et O. Dousse, 2005a. Mobility improves coverage of sensor networks. *Proc. of the ACM MobiHoc 2005 Conference*.
- (Liu et al., 2005b) B. Liu, P. Brass, O. Dousse, P. Nain, et D. Towsley, 2005b. Mobility improves coverage of sensor networks. in *Proc. Mobihoc, Urbana-Champaign*.
- (Liu et al., 2007) C. Liu, T. Scott, K. Wu, et D. Hoffman, 2007. Range-free sensor localisation with ring overlapping based on comparison of received signal strength indicator. *International Journal of Sensor Networks 2007 - Vol. 2, No.5/6 pp. 399 - 413*.
- (Liu et al., 2005c) D. Liu, P. Ning, et W. K. Du, 2005c. Attack-resistant location estimation in sensor networks. *IPSN'05*, pp. 99-106.
- (M. Boushaba et Benslimane, 2007) A. H. M. Boushaba et A. Benslimane, 2007. Ha-a2l : Angle to landmark-based high accuracy localization method in sensor networks. *IEEE/ACM Int. Wireless Communications and Mobile Computing Conf. IWCMC 2007, Honolulu, Hawaii, USA*.
- (Moore et al., 2004) D. Moore, J. Leonard, D. Rus, et S. Teller, 2004. Robust distributed network localization with noisy range measurements. Dans les actes de *Proc. 2nd ACM SenSys*.
- (Moscibroda et al., 2004) T. Moscibroda, R. O'Dell, M. Wattenhofer, et R. Wattenhofer, 2004. Virtual coordinates for ad hoc and sensor networks. *Mobihoc*.
- (Moscibroda et Wattenhofer, 2005) T. Moscibroda et R. Wattenhofer, 2005. Maximizing the lifetime of dominating sets. *19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05) - Workshop 12 p.242b*.

- (Nagpal et al., 2003) R. Nagpal, H. Shrobe, et J. Bachrach, 2003. Organizing a global coordinate system from local information on an ad hoc sensor network. *In the 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '03)*.
- (Niculescu et Nath, 2001) D. Niculescu et B. Nath, 2001. Ad hoc positioning system (aps). *in Proceedings of GLOBECOM, San Antonio*.
- (Niculescu et Nath, 2003a) D. Niculescu et B. Nath, 2003a. Ad hoc positioning system (aps) using aoa. *IEEE INFOCOM 2003, San Francisco, CA*.
- (Niculescu et Nath, 2003b) D. Niculescu et B. Nath, 2003b. Dv based positioning in ad hoc networks. *Journal of Telecommunication Systems*.
- (Niculescu et Nath, 2004) D. Niculescu et B. Nath, 2004. Error characteristics of ad hoc positioning systems (aps). *Mobihoc*.
- (P. et M.L., 2005) R. P. et S. M.L., 2005. Robust, probabilistic, constraint-based localization for wireless sensor networks. *2rd Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*.
- (P. et M.L., 2006) R. P. et S. M.L., 2006. Angle of arrival localization for wireless sensor networks. *3rd Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*.
- (Parkinson et al, 1996) B. Parkinson et al, 1996. Global positioning system : Theory and application. *Progress in Astronomics and Aeronotics volume I*.
- (Perkins et al., 2003) C. E. Perkins, E. Belding-Royer, et S. R. Das., 2003. Ad-hoc on-demand distance vector (aodv). Dans les actes de <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>, RFC3561.
- (Priyantha et al., 2005) N. B. Priyantha, H. Balakrishnan, E. D. Demaine, et S. Teller, 2005. Mobile-assisted localization in wireless sensor networks. *IEEE Infocom*.
- (Priyantha et al., 2000) N. B. Priyantha, A. Chakraborty, et H. Balakrishnan, 2000. The cricket location-support system. *International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston*.
- (Rodoplu et Meng, 1998a) V. Rodoplu et T. Meng, 1998a. Minimum energy mobile wireless networks. *In Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*.
- (Rodoplu et Meng, 1998b) V. Rodoplu et T. Meng, 1998b. Minimum energy mobile wireless networks. Dans les actes de *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1633 – 1639.
- (rong Chen et Chang, 2003) B. rong Chen et C. H. Chang, 2003. Mobility impact on energy conservation of ad hoc routing protocols. *SSGRR 2003, Italy*.
- (Rossi et al., 2005) M. Rossi, M. Zorzi, et R. Rao, 2005. Cost efficient routing strategies over virtual coordinates for wireless sensor networks. Dans les actes de *Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*.

- (Saad, 2006) C. Saad, 2006. Une nouvelle méthode de positionnement dans les réseaux de capteurs. *Algotel. Trégastel, France*.
- (Saad et al., 2008c) C. Saad, A. Benslimane, J. Champ, et J.-C. König, 2008c. Ellipse routing : A geographic routing protocol for mobile sensor networks with uncertain positions. *Globecom'08, New Orlean, LA, USA*.
- (Saad et al., 2006) C. Saad, A. Benslimane, et J.-C. König, 2006. Mur : A distributed preliminary method for location techniques in sensor networks. *2nd IEEE International conference on wireless and mobile computing, networking and communications (WiMob)*.
- (Saad et al., 2007) C. Saad, A. Benslimane, et J.-C. König, 2007. A distributed method to localization for mobile sensor networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*.
- (Saad et al., 2008a) C. Saad, A. Benslimane, et J.-C. König, 2008a. At-angle : A distributed method for localization using angles in sensor networks. *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Marrakesh, Morocco*.
- (Saad et al., 2008b) C. Saad, A. Benslimane, et J.-C. König, 2008b. At-dist : A distributed method for localization with high accuracy in sensor networks. *Special Issue on "Wireless Ad Hoc and Sensor Networks" in the international journal Studia Informatica Universalis (published by the editions SUGER)*.
- (Saad et al., 2007) C. Saad, A. Benslimane, J.-C. König, et J. Turbert, 2007. At-free : A preliminary method for localization techniques in sensor networks. *7th International Conference on New Technologies of Distributed Systems. Marrakesh, Morocco*.
- (Savarese et Rabaey, 2002) C. Savarese et J. Rabaey, 2002. Robust positioning algorithms for distributed ad-hoc sensors networks. *in USENIX technical annual conference, (Monterey, CA), pp. 317-328*.
- (Savvides et al., 2001) A. Savvides, C.-C. Han, et M. B. Strivastava, 2001. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. *ACM SIGMOBILE*.
- (Savvides et al., 2002) A. Savvides, H. Park, et M. Srivastava, 2002. The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems. *First ACM International WSNA, Atlanta*.
- (Shaikh et al.,) J. A. Shaikh, J. Solano, I. Stojmenović, et J. Wu. New metrics for dominating set based energy efficient activity scheduling in ad hoc networks.
- (Simić et Sastry, 2001) S. N. Simić et S. Sastry, 2001. Distributed localization in wireless ad hoc networks. *Tech. Rep. UCB/ERL M02/26, UC Berkley*.
- (Stojmenovic et Datta, 2002) I. Stojmenovic et S. Datta, 2002. Power and cost aware localized routing with guaranteed delivery in wireless networks. Dans les actes de *ISCC '02 : Proceedings of the Seventh International Symposium on Computers and Communications (ISCC'02), Washington, DC, USA. IEEE Computer Society*.

- (Stojmenovic et Lin, 2000) I. Stojmenovic et X. Lin, 2000. Power-aware localized routing in wireless networks. *IEEE Int. Parallel and Distributed Processing Symp., Cancun, Mexico*.
- (Stojmenovic et Lin, 2001a) I. Stojmenovic et X. Lin, 2001a. Loop-free hybrid single-path/flooding routing algorithms with guaranteed delivery for wireless networks. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 12(10), 1023–1032.
- (Stojmenovic et Lin, 2001b) I. Stojmenovic et X. Lin, 2001b. Power-aware localized routing in wireless networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 1122–1133.
- (Takagi et Kleinrock, 1984) H. Takagi et L. Kleinrock, 1984. Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals. *IEEE Transactions on Communications*, 246–257.
- (Tilak et al., 2005) S. Tilak, V. Kolar, N. B. Abu-Ghazaleh, et K.-D. Kang, 2005. Dynamic localization protocols for mobile sensor networks. *IEEE IWSEEASN 2005*.
- (Tseng et al., 2002) Y.-C. Tseng, S.-Y. Ni, Y.-S. Chen, et J.-P. Sheu, 2002. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. *Wirel. Netw.*, 153–167.
- (Varga, 2001) A. Varga, 2001. The omnet++ discrete event simulation system. *European Simulation Multiconference (ESM'2001), Prague, Czech Republic*.
- (Čapkun et al., 2001) S. Čapkun, M. Hamdi, et J.-P. Hubaux, 2001. Gps-free positioning in mobile ad-hoc networks. *in Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*.
- (Venkatraman et J. Caffery, 2003) S. Venkatraman et J. J. Caffery, 2003. Multipath-aided location estimation using angles-of-arrival. *in Proceedings of SPIE*.
- (Venkatraman et al., 2002) S. Venkatraman, J. J. Caffery, et H. R. You, 2002. Location using los range estimation in nlos environments. *in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, vol. 2, pp. 856-860, Spring 2002*.
- (Wan et al., 2002) P.-J. Wan, C.-W. Yi, X.-Y. Li, Y. Wang, et O. Frieder, 2002. Asymptotic distribution of critical transmission range for k-connectivity in wireless ad hoc networks. *Submitted for publication*.
- (Want et al., 1992) R. Want, A. Hopper, V. F. ao, et J. Gibbons, 1992. The active badge location system. *IEEE Personal Communications Magazine*.
- (Whitehouse et Culler, 2002) K. Whitehouse et D. Culler, 2002. Calibration as parameter estimation in sensor networks. *First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Application (WSNA), Atlanta, GA pp. 59-67*.
- (Wu et Li, 1999) J. Wu et H. Li, 1999. On calculating connected dominating set for efficient routing in ad hoc wireless networks. *In DIAL M'99, Seattle*.

Résumé

Comme le firent Internet et les communications sans fil il y a de cela quelques décennies, l'avènement des réseaux de capteurs s'apprête à révolutionner notre mode de vie. Mais avant de voir ces réseaux atteindre un degré de démocratisation identique à celui des téléphones portables par exemple, un certain nombre de problématiques doit être résolu. Aux contraintes traditionnelles des réseaux ad hoc s'ajoutent les limites très strictes liées aux caractéristiques matérielles des capteurs telles que la puissance de calcul, la mémoire et surtout l'alimentation en énergie, rendant les algorithmes existants inadaptés. Cette thèse aborde deux problématiques : celle de la *localisation* et celle du *routage*. Concernant la localisation, une famille de trois méthodes est proposée pour estimer les positions des capteurs en y associant des bornes d'erreur, à partir de localisations exactes connues pour certains d'entre eux et en fonction de leurs capacités de mesures. Cette famille est ensuite étendue aux réseaux de capteurs mobiles. Vient alors le problème du routage permettant l'acheminement d'un message d'un capteur vers une station de base lorsqu'il détecte un événement. Les stratégies de routage dit géographique s'appuient sur les positions des capteurs qui sont considérées comme exactes. Or, dans la pratique, ces positions sont rarement précises. Cette thèse propose deux algorithmes de routage destinés respectivement aux réseaux de capteurs statiques et mobiles en considérant des positions estimées, rendant ainsi ces méthodes compatibles avec les algorithmes de localisation.

Mots clés : *réseaux de capteurs, localisation, routage, énergie, algorithmique distribuée*

Abstract

As did it Internet and wireless communications some decades ago, the advent of sensor networks prefaces a revolution in our way of life. But before seeing these networks reach a democratization degree identical for example to the mobile phones one, some problems must be solved. To traditional constraints of ad hoc networks, should be added hardware limitations of sensors such as computing power, memory size and especially energy consumption, which make existing algorithms unsuitable. This thesis addresses two problems : *localization* and *routing*. On the localization side, a family of three methods is proposed to estimate sensor positions by associating error bounds, out of some sensors known exact localizations and depending to their measure capacity. Then, this family is extended to mobile sensor networks. The routing problem occurs when a sensor detects an event and wants to alert a base station. Routing strategies known as geographical are based on exact sensors positions. However, in practice, these positions are seldom accurate. This thesis proposes respectively two routing algorithms intended for static or mobile sensor networks by considering estimated positions, making these methods compatible with the localization algorithms.

Keywords : *sensor networks, localization, routing, energy, distributed algorithms*