



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



U.F.R. : Faculté des Sciences & Technologies
Ecole Doctorale : IAEM Lorraine

Centre de Recherche en Automatique de Nancy
UMR CNRS 7039

Thèse

Présentée pour l'obtention du titre de
Docteur de l'Université de Lorraine

en Sciences, spécialité Automatique, Traitement du Signal et Génie Informatique

par **Abdellatif CHAFIK**

ARCHITECTURES DE RESEAU DE CAPTEURS POUR LA SURVEILLANCE DE GRANDS SYSTEMES PHYSIQUES A MOBILITE CYCLIQUE

Membres du jury :

Rapporteurs : Professeur Ken CHEN, Université Paris XIII
 Professeur Thierry VAL, Université Toulouse 2

Examineurs : Professeur Jean-Jacques LESAGE, ENS Cachan
 Professeur Michel ZASADZINSKI, Université de Lorraine
 Vincent LECUIRE, Maître de Conférences, Université de Lorraine
 Professeur Francis LEPAGE, Université de Lorraine, Directeur de thèse

CRAN, Campus Sciences, B.P. 70239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy

A la mémoire de mes parents

Remerciements :

Ce travail a été effectué au sein du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN), dirigé par le Professeur **Didier WOLF** que je remercie vivement pour son accueil au sein du laboratoire.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance au Professeur **Francis LEPAGE** mon directeur de thèse, pour la confiance qu'il a eue en moi, le soutien constant qu'il m'a offert pour avoir encadré mon travail de thèse, pour ses conseils éclairés, ses encouragements, la patience et l'intérêt qu'il a porté à mes travaux tout au long de leur avancement, et pour ces qualités humaines rares.

Je remercie chaleureusement le Professeur **Thierry VAL** pour avoir accepté de rapporter cette thèse, pour son soutien, les discussions que nous avons eues, ses nombreux conseils et l'intérêt qu'il a porté à mon travail. Je remercie très sincèrement le Professeur **Ken CHEN** qui a accepté d'être rapporteur de cette thèse.

Je remercie également Messieurs les Professeurs **Jean-Jacques LESAGE** et **Michel ZASADZINSKI** pour avoir accepté d'examiner mes travaux et de participer au jury de cette thèse.

Je remercie également M. **Vincent LECUIRE** pour sa patience, sa gentillesse, et les nombreuses discussions que nous avons pu avoir ensemble.

Je remercie vivement Monsieur le Professeur **Thierry DIVOUX**, directeur adjoint du CRAN, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire pendant la durée de ce travail et pour sa disponibilité.

Je remercie également M. **Jean-Philippe GEORGES** et M. **Eric RONDEAU** pour leur collaboration et leurs disponibilités.

J'adresse mes remerciements, à M. **Abdelhak ENNACIRI** responsable maintenance et M. **Mohamed GHIAT** directeur technique de la société Ingelec Casablanca Maroc, de m'avoir donné l'occasion de faire des expériences sur la machine de peinture.

Mes remerciements iront aussi à tous les membres de la famille **DIOURI** pour leur soutien moral et financier.

Je remercie mon épouse pour son soutien, sa patience et ses encouragements constants. Je souhaite aussi remercier mes deux enfants **Abderrahmane** et **Mohamed Taha**, pour leur amour et leur soutien constant.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude à mes frères et à mes beaux-parents sur qui j'ai toujours pu compter.

Sommaire

Chapitre 1 :	Introduction	7
Chapitre 2 :	Objectif, Scénario, problématique et positionnement.....	11
2.1	Introduction	12
2.2	Objectif.....	12
2.3	Scénario et hypothèses	13
2.4	Typologie des systèmes et définition d'une nomenclature	13
2.5	Problématiques de recherche.....	14
2.6	Positionnement des travaux.....	19
2.6.1	Les réseaux de capteurs sans fil	19
2.6.2	Monitoring à l'aide d'un réseau de capteur.....	23
2.6.3	Topologie de réseau de capteurs	24
2.6.4	Routage dans un réseau de capteurs mobiles	25
2.6.5	Localisation des nœuds	26
2.7	Conclusion.....	33
Chapitre 3 :	Topologie de relais fixes pour un système mécanique mobile sur une trajectoire circulaire.....	35
3.1	Introduction	37
3.2	Typologie des systèmes.....	38
3.2.1	Système isolé.....	38
3.2.2	Système avec distribution de sous-ensembles le long de la trajectoire	38
3.2.3	Système avec rayons mécaniques	39
3.3	Topologie pour trajectoire de petit rayon	40
3.4	Topologie pour trajectoire de grand rayon	43
3.4.1	Introduction	43
3.4.2	Grille à pavement carré	43
3.4.3	Chemin de bordure	51
3.4.4	Placement de nœud relais par arbre de Steiner	53
3.5	Routage pour topologie à relais fixes	56
3.5.1	Routage pour le premier saut	56
3.5.2	Routage dans le réseau fixe.....	57
3.6	Localisation	58
3.6.1	Utilisation d'un GPS	58

3.6.2	Identificateur de cellule	59
3.6.3	Localisation par empreintes du RSSI	59
3.6.4	Localisation à l'aide d'accéléromètres	60
3.7	Analyse de performances	62
3.7.1	Modèle de simulation et critères de performances	62
3.7.2	Evaluation sur l'exemple	63
3.8	Conclusion	74
Chapitre 4 : Topologie de relais embarqués pour un système mécanique mobile sur une trajectoire circulaire		75
4.1	Introduction	76
4.2	Topologie avec relais embarqués	76
4.3	Proposition d'un routage dynamique adapté	78
4.4	Evaluation des performances	81
4.4.1	Méthode	81
4.4.2	Résultats	83
4.5	Conclusion	86
Chapitre 5 : Expérimentation sur un site industriel		87
5.1	Introduction	88
5.2	La chaîne de peinture	88
5.3	Topologie déployée	89
5.4	Méthodologie de localisation à base du RSSI	90
5.4.1	Le mobile se prend en charge pour se localiser	90
5.4.2	Le calcul de la position se fait sur un serveur par réseau de neurones artificiel	92
5.5	Expérience et résultats	100
5.5.1	Résultats des deux approches : triangulation et réseaux de neurone	100
5.5.2	Projection sur la trajectoire	102
5.6	Conclusion	105
Chapitre 6 : Conclusion		106
Liste des figures		111
Liste des tableaux		113
Tables d'abréviations		114
Liste des publications de l'auteur		115
Bibliographie		116

Chapitre 1 : Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche depuis plus de 10 ans. Depuis la spectaculaire démonstration de déploiement d'un tel réseau composé de 800 nœuds sur le campus de Berkeley en août 2001, de nouveaux algorithmes de routage, de nouveaux protocoles MAC, des algorithmes de « clustering », des techniques de déploiement et de nouvelles techniques de localisation des nœuds ont été proposés pour améliorer l'efficacité des réseaux de capteurs : performances des communications, efficacité énergétique et donc durée de vie, qualité des informations délivrées.

Il apparaît aujourd'hui que les recherches ont atteint leur maturité en considérant le réseau de capteur comme objet intrinsèque des études donc en dehors de son contexte d'utilisation. C'est la raison pour laquelle les travaux de recherche réalisés pour cette thèse sont dédiés aux réseaux de capteurs dans un contexte assez précis tant sur le plan de l'aire de déploiement, un grand équipement mécanique en mouvement répétitif, que sur celui de l'application, la surveillance temporaire de cet équipement. Nous utilisons un problème d'ingénierie, le déploiement d'un réseau de capteur pour surveiller un grand système physique, pour donner du sens à des recherches méthodologiques sur les réseaux de capteurs mobiles et s'appuyer sur des paramètres réels pour tester les performances des solutions proposées.

Le scénario de l'application est déduit des besoins des organismes de certification et de vérification de la sécurité des grands équipements mobiles. En instrumentant l'équipement à contrôler lors de la visite, les inspecteurs peuvent obtenir des informations quantitatives sur des paramètres très variés du système en fonction des conditions d'exploitation. A titre d'exemple très explicite, il est possible ainsi de mesurer le balancement d'un siège d'un télésiège en fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de déplacement, de la masse des passagers et de leur positionnement sur le siège. Le choix d'enregistrer les informations en temps réel dans une station de surveillance implantée dans un local au sol donne une grande souplesse d'utilisation à ce système d'acquisition de données.

Une étude bibliographique a montré l'absence de travaux de recherches antérieurs sur ce thème. D'un point de vue technique, il existe des solutions de capture d'informations sur des grands systèmes en mouvement. Elles sont fournies par les nombreux « Dataloggers » ou enregistreurs de données disponibles sur le marché qui intègrent des capteurs sans fil, comme celui de la société française Intesens¹. Mais ces systèmes utilisent des technologies spécifiques et ne tirent pas profit de la technologie des réseaux de capteurs sans fil ni de toutes les méthodologies associées. Notre étude s'appuie sur un réseau de capteurs standard, disponible sur étagère. Elle vise donc à exploiter au mieux les caractéristiques de ces réseaux pour réaliser un système d'acquisition performant, robuste et économique. Pour y parvenir, l'étude réalisée dans cette thèse doit aboutir à des propositions d'architectures types et des prévisions de performances associées.

La caractéristique la plus importante du réseau de capteurs à déployer réside dans la mobilité d'une partie des nœuds. Le réseau comprend donc une liaison entre un nœud mobile et un nœud fixe (au sol) qui met en correspondance des nœuds différents au cours du temps, dans le cas général, car la portée radio des nœuds est inférieure à l'amplitude du déplacement du système mobile. La trajectoire étant connue et étant invariante, un fonctionnement optimisé du réseau est naturellement obtenu en plaçant judicieusement des nœuds relais assurant la connectivité permanente entre le ou les capteurs et le puits assimilé à la station d'enregistrement des données.

¹ <http://intesens.com/>

La stratégie de placement de ces relais, donc la topologie du réseau, est donc à étudier en détail et constitue une partie importante de cette thèse.

La topologie étant dynamique, le routage des paquets doit l'être aussi. Le déterminisme des déplacements doit être utilisé pour calculer ce routage de manière simple. Cette caractéristique démarque cette étude de celles effectuées pour les MANETs dans lesquels la mobilité est plus aléatoire. Le routage a besoin de la position des nœuds mobiles. L'application a aussi besoin d'associer la position aux données captées. Le besoin en localisation des nœuds est donc important. C'est donc aussi une thématique étudiée dans cette thèse. Deux solutions ont été testées en site réel ; d'autres expérimentations n'ont pas abouties faute de temps. La localisation des nœuds est un sujet largement étudié mais malgré les résultats existants, elle constitue encore un problème largement ouvert.

Les recherches réalisées dans le cadre de cette thèse sont donc constituées de trois volets : une étude de topologie d'un réseau de capteurs mobiles, une étude du routage correspondant à chaque topologie proposée et une étude de solutions de localisation. Une architecture de réseau de capteurs mobiles est constituée d'un triplet <topologie – routage - localisation> chaque élément est une proposition de l'étude correspondante au domaine.

Organisation du mémoire

Le mémoire est organisé en 6 chapitres dont cette introduction qui en constitue le chapitre 1.

Le chapitre 2 présente l'objectif des recherches puis le scénario retenu pour les situer dans le contexte assez précis de la surveillance des grands systèmes physiques en mouvement sur une trajectoire invariante. Ces grands systèmes présentent des caractéristiques très variables tant par leur morphologie que par leur trajectoire: une grande éolienne est différente d'un télésiège. Ceci nous a conduits à proposer une typologie et une nomenclature. Nous déterminons ensuite les trois problématiques de recherche issues du problème d'ingénierie à résoudre : la topologie des réseaux de capteurs mobiles, le routage et la localisation. Nous positionnerons ensuite nos travaux par rapport à l'existant dans ces trois domaines.

Le chapitre 3 présente des propositions d'architectures basées sur des relais fixes pour un système mobile sur une trajectoire circulaire. Dans ce cas, le ou les capteurs mobiles transmettent les données vers un ou plusieurs relais fixes et un réseau de relais permet d'acheminer les paquets vers le puits. Trois types de topologies sont proposées : une s'appuyant sur un pavement carré, une autre sur des relais placés sur ou en bordure de la trajectoire du mobile et la dernière basée sur les arbres de Steiner. Un algorithme de routage efficace, utilisant bien les propriétés des topologies, est proposé pour chacune des deux premières topologies. Une étude de performance est ensuite réalisée par simulation sur un exemple académique et sur le système mécanique réel et typique que constitue la grande roue de Singapour nommée *Singapore Flyer*. Les résultats montrent que des périodes d'échantillonnage assez faibles peuvent être atteintes et donc des phénomènes très dynamiques peuvent être observés.

L'approche d'architecture utilisant une topologie de nœuds embarqués, toujours pour un mobile se déplaçant sur une trajectoire circulaire, fait l'objet du chapitre 4. La liaison système mobile – sol est alors réalisée au niveau du puits. Elle est établie temporairement avec le ou les nœuds relais mobiles qui se trouvent dans son disque de propagation. Les paquets sont acheminés dans le réseau embarqué depuis le ou les capteurs actifs grâce à un routage

dynamique utilisant la localisation du mobile. Une étude de performance réalisée par simulation sur la grande roue de Singapour montre que cette approche est très performante. Elle est de plus très économique pour un tel type de système car tous les relais sont des nœuds capteurs donc il n'y a aucun coût additionnel pour faire fonctionner le réseau.

Le chapitre 5 est consacré à une expérimentation réalisée sur un système réel dans une entreprise de fabrication de matériels électriques. Ce système est un convoyeur. Il a pu être utilisé pendant une courte période d'arrêt de la production pour maintenance. Un réseau de capteurs a été installé et deux systèmes de localisation ont été mis en œuvre et évalués. Les résultats montrent qu'une localisation de résolution suffisante peut être obtenue à partir de la puissance du signal reçu sur des ancres en utilisant le traitement des empreintes par réseau de neurones.

Ce mémoire se termine par le chapitre 6. Il présente une comparaison des architectures proposées et une synthèse des propositions avec leurs performances. Des perspectives d'extension des travaux sont proposées notamment des tests de performance sur des systèmes mécaniques de typologie différente de celle retenue pour cette thèse.

Chapitre 2 : Objectif, Scénario, problématique et positionnement

2.1	Introduction	12
2.2	Objectif.....	12
2.3	Scénario et hypothèses	13
2.4	Typologie des systèmes et définition d'une nomenclature	13
2.5	Problématiques de recherche.....	14
2.6	Positionnement des travaux.....	19
2.6.1	Les réseaux de capteurs sans fil	19
2.6.1.1	Généralités.....	19
2.6.1.2	Types de RCSF.....	21
2.6.1.3	Domaines d'application d'un RCSF	22
2.6.1.4	Consommation d'énergie dans un RCSF	22
2.6.2	Monitoring à l'aide d'un réseau de capteur.....	23
2.6.3	Topologie de réseau de capteurs	24
2.6.4	Routage dans un réseau de capteurs mobiles	25
2.6.5	Localisation des nœuds	26
2.6.5.1	Introduction : les différentes méthodes	26
2.6.5.2	Localisation en extérieure par un GPS	26
2.6.5.3	Les techniques Range-based	27
2.6.5.4	Les techniques Range-free	31
2.6.5.5	Identification par empreintes.....	32
2.6.5.6	Positionnement par capteurs proprioceptifs	32
2.7	Conclusion.....	33

2.1 Introduction

Les progrès dans le domaine des réseaux sans fil et particulièrement le développement des réseaux de capteurs sans fil donnent de nouvelles possibilités pour acquérir des informations provenant de systèmes physiques. La notion de *Cyber Physical System* exprime la possibilité d'intégrer de l'information dans un système physique et d'agir à partir du traitement de ces informations. Après de nombreux travaux à finalité générale sur les réseaux de capteur sans fil, il apparaît que les nouveaux progrès sur la connaissance de l'utilisation de ces systèmes et des performances qui peuvent être attendues seront obtenus par des études sur des scénarios précis de mise en situation. C'est pourquoi nous détaillons dans ce chapitre l'objectif précis du contexte dans lequel se place notre étude : un système de surveillance d'un grand système physique en mouvement répétitif et le scénario retenu pour cette surveillance. La variété des grands systèmes concernés et des trajectoires de leur mouvement nous a conduits à proposer une typologie et une nomenclature. Nous dégagerons ensuite les problématiques de recherche qui guideront nos travaux. Elles ont trait à trois domaines : la topologie des réseaux de capteurs mobiles, le routage et la localisation. La démarche scientifique nous amènera ensuite à positionner notre étude par rapport aux travaux existants et par rapport aux technologies des réseaux de capteurs sans fil. Ce positionnement permet de faire ressortir les résultats existants exploitables et de préciser les recherches à conduire pour finaliser notre étude sur quelques exemples de systèmes mécaniques.

2.2 Objectif

L'objectif des travaux de recherche est de concevoir et d'optimiser un système de mesure destiné à la caractérisation ou à la surveillance d'un grand équipement physique (mécanique) mobile sur une trajectoire unique connue. Ce système a plutôt vocation à être utilisé de manière temporaire pour certifier un équipement ou vérifier son bon fonctionnement. Il peut toutefois être utilisé de manière permanente, mais il sera alors doté d'une alimentation électrique spécifique et sera paramétré spécifiquement. Un réseau de capteurs sans fil est un dispositif bien approprié pour réaliser un tel système. Il permet un déploiement rapide grâce à ses deux propriétés avantageuses : l'absence d'infrastructure et l'auto-configuration. De plus les liaisons radio sont bien adaptées aux nœuds mobiles. Comme au moins un nœud est mobile, ce réseau est un réseau de capteurs mobile ou en anglais *Mobile Wireless Sensor Network - MWSN*. Un MWSN est à la fois un WSN et un MANET (Mobile Ad-hoc NETwork). Il se distingue du cas général des MANET par la présence d'un ou plusieurs capteurs sur chaque nœud et par les faibles puissance et ressources disponibles.

Pour des raisons économiques et pour une maintenance aisée, une contrainte est d'utiliser un réseau de capteurs du commerce, disponible sur étagère. Il existe plusieurs produits, mais le choix est assez restreint. Ainsi les capacités de traitement et de mémorisation, les caractéristiques des liens radio et du protocole MAC sont prédéfinies. Il en résulte des performances limitées en termes de capacité, de fiabilité de transmission et de délai de livraison des paquets.

La surveillance d'un grand système mécanique mobile est un vrai challenge au niveau capture d'informations pertinentes. Cela signifie saisir des données à de nombreux endroits, les transmettre sur une (relativement) grande distance en traversant une liaison mobile – fixe. L'instrumentation peut être conçue soit pour surveiller en continu l'installation, diagnostiquer

les dysfonctionnements et ainsi assurer sa sécurité soit pour faire des mesures durant une phase de vérification ou de certification. Pour ce dernier usage, le capteur ou l'ensemble des capteurs peuvent mesurer des paramètres spécifiques à la partie mobile (vibrations, forces exercées sur une pièce mécanique,...) ou des paramètres environnementaux tout le long de la trajectoire du mobile (vitesse du vent, température,...) ou une combinaison des deux.

2.3 Scénario et hypothèses

Considérons un grand équipement de type transporteur aérien de matériaux comme celui exploité par la société Vicat dans sa cimenterie de Grenoble², long de 1830 mètres et doté de 56 godets, ou la grande roue d'observation touristique de Singapour, the Singapore Flyer³, d'un diamètre de 150 mètres, avec une hauteur totale de 165 mètres et dotée de 28 nacelles. Dans les deux cas, mais plus particulièrement dans le second, la sécurité de l'équipement doit être assurée sans défaillance. Des visites périodiques d'une commission de sécurité sont programmées à cet effet. La disponibilité doit également être très élevée.

Pour que l'audit de sécurité s'appuie sur des données d'observation précises, supposons que la commission installe un dispositif qui réalise des mesures sur différentes parties du mobile, par exemple sur chaque godet ou nacelle. Ce dispositif envoie les valeurs mesurées à une station fixe pour analyse, mémorisation et visualisation. Cette station doit être installée au sol pour de multiples raisons : alimentation électrique plus aisée, environnement tempéré, propre et peu agressif, confort de l'opérateur.

Le capteur doit être capable d'envoyer ses données immédiatement après la mesure indépendamment de sa position. C'est une exigence pour une application de surveillance. Pour une application de prise de mesures en vue d'une certification technique ou pour un audit d'une commission de sécurité un enregistrement des mesures et un traitement différé sont possibles. Toutefois un traitement en temps réel présente deux avantages principaux pour ce type d'application : l'un est de gagner du temps et le second est d'avoir la possibilité de changer le scénario opérationnel de mesure en modifiant des paramètres (autres vitesses du mobile, autres stimulus) si des mesures approchent des seuils ou si des artefacts sont détectés.

2.4 Typologie des systèmes et définition d'une nomenclature

Les grands systèmes mécaniques mobiles sont en œuvre dans l'industrie, dans les transports et dans les parcs de loisirs. Ce sont des trains, des métros, des tramways, des chaînes de montage ou de convoyage, des éoliennes, des télésièges, des manèges et attractions diverses. Un grand système mécanique mobile peut être aussi typé par la trajectoire qu'il parcourt. Dans le but de concevoir un système de surveillance performant et déterministe, nous focalisons notre étude sur **les systèmes qui parcourent cycliquement une trajectoire unique**, périodiquement ou non. En effet, cette propriété permet de concevoir un réseau d'acquisition de données sur le mobile avec une **connectivité permanente assurée** jusqu'au site fixe de traitement des informations. De plus cette spécificité doit permettre d'optimiser la topologie du réseau de capteurs et deux fonctions essentielles : la localisation du ou des nœuds capteurs et le routage des parquets d'information du capteur vers la machine de traitement.

² <http://www.poma.net/fr/project/index/view/id/28>

³ <http://www.singaporeflyer.com>

Leur morphologie permet ou non d'implanter des relais à bord et de placer ou non un puits fixe à l'intérieur de la trajectoire. Nous proposons de classer ces systèmes selon trois types de morphologie : système monolithique, système isolé, sous-systèmes chaînés.

Système monolithique

Le système est constitué d'une seule pièce ou de pièces reliées mécaniquement de manière à constituer un seul ensemble non déformable. La taille du système est de l'ordre de celle de la trajectoire de mobilité, c'est cette taille relative qui le distingue d'un système isolé. En raison de l'encombrement du système, il n'est pas toujours possible de placer le puits à l'intérieur de la trajectoire. Un exemple courant de ce type de système est une grande éolienne.

Système isolé

Ce type est caractérisé par un système mécanique de taille modeste en regard de la trajectoire sur laquelle il se déplace. Ce n'est donc pas véritablement un grand système mécanique si on le considère isolément de son mouvement. Cela peut être un engin automoteur se déplaçant sur une piste, guidé par un ou des rails ou par un système sans contact. Un seul nœud capteur mobile est donc installé. Un exemple de système de ce type est un cycliste faisant une compétition sur une piste.

Système distribué

Ce type est caractérisé par des petits modules liés par des liaisons déformables se déplaçant tous sur la même trajectoire. Un nœud capteur est installé sur chaque module. Chaque nœud peut être utilisé comme simple capteur ou être utilisé comme simple relais ou remplir les deux fonctions. Un exemple courant de ce type de système est un télésiège.

Nomenclature

Les deux approches de typologie précédentes doivent être combinées pour définir précisément un système. La nomenclature retenue possède donc deux attributs : un code trajectoire – un code morphologie, avec :

Code trajectoire : TC = trajectoire circulaire ; TLF = trajectoire linéaire fermée (deux lignes parallèles avec bouclage aux extrémités); TLO = trajectoire linéaire ouverte (parcourue alternativement dans chaque sens) ; TQF = trajectoire quelconque fermée ; TQO = trajectoire quelconque ouverte.

Code de morphologie : SM = système monolithique ; SI = système isolé ; SD = système distribué.

Exemple : un télésiège est étiqueté TLF – SD.

2.5 Problématiques de recherche

L'objectif général de notre travail est de concevoir un système de capteurs capable d'acquérir la bonne information au bon endroit, en temps voulu et avec suffisamment de précision et de transmettre les données à la station de traitement en temps réel et sans perte. Le format de l'information et ses conséquences sur l'interopérabilité et sur la sécurité ne sont pas pris en compte dans ce travail. L'utilisation du standard ISO/IEC/IEEE 21451 (Wang, Junyu et al., 2013) n'est pas évaluée, mais constitue certainement une piste pour déterminer ce format. Dans cette thèse, chaque mesure sera considérée comme une suite d'environ 20 octets incluant sa localisation donc constitue la charge d'un paquet issu d'un nœud capteur.

Comme la technologie est globalement déterminée, les variations de performances sont étroitement dépendantes des qualités de la topologie du réseau et du routage. Les performances attendues du système de mesure, ou sa qualité de service, sont le minimum de délai entre la saisie et la fourniture des données, un débit suffisant et un taux de perte très faible. Les problématiques de recherche sont donc de trouver d'une part une méthodologie de conception de topologie dynamique s'adaptant en permanence à la mobilité du ou des capteurs embarqués, assurant en permanence des chemins avec un nombre de sauts optimisés et sans goulot d'étranglement et d'autre part une méthode de routage qui suive parfaitement la dynamique de la topologie et assure que les paquets transitent par le meilleur chemin.

La topologie

La topologie joue un rôle vital dans les réseaux de capteurs en minimisant différentes contraintes comme l'énergie limitée embarquée sur chaque nœud, la latence, les ressources de calcul et de mémorisation et favorisant la qualité des communications. Par exemple, le coût énergétique de la réception d'un paquet dépend de sa taille, mais son coût d'émission dépend aussi de la distance entre les nœuds communicants. Le coût énergétique de réception est plus grand que le coût en émission (Fourty et al., 2012). La topologie définit des chemins possibles de routage des paquets, mais détermine aussi si les paquets doivent être émis en mode *unicast*, c'est-à-dire adressés à un destinataire ou en mode *broadcast*, c'est-à-dire diffusés à tous les récepteurs potentiels. Elle doit assurer un faible taux d'interférence et une distance entre les nœuds communicants qui minimisent la probabilité de perte de paquet.

La topologie d'un réseau de capteurs est d'abord liée à la topologie physique c'est-à-dire à l'emplacement géographique des nœuds. La topologie physique dépend du modèle de déploiement des nœuds qui est soit de type aléatoire soit de type déterminé (ou organisé). Le déploiement aléatoire ne conduit pas à une solution optimale et son utilisation est réservée aux réseaux de surveillance de grande taille avec des nœuds fixes ou déployés sur une zone difficile d'accès.

Dans le cas considéré, le déploiement doit être optimisé et donc les emplacements des nœuds doivent être calculés soigneusement. La topologie du réseau de capteurs est bien sûr liée à la morphologie du système mobile : la topologie du réseau installé sur la grande roue sera différente de celle d'un réseau installé sur le transporteur de matériaux.

Une contrainte forte réside dans le lien entre la partie mobile et la partie fixe du réseau. Suivant la morphologie du système mobile et la trajectoire, la topologie sera constituée suivant trois cas :

- Cas 1 : un ou plusieurs nœuds capteurs mobiles et un puits fixe situé dans la cellule de communication de chaque nœud capteur donc la ou les liaisons mobile-fixe sont invariables et les paquets sont acheminés en un saut (Figure 2-1).

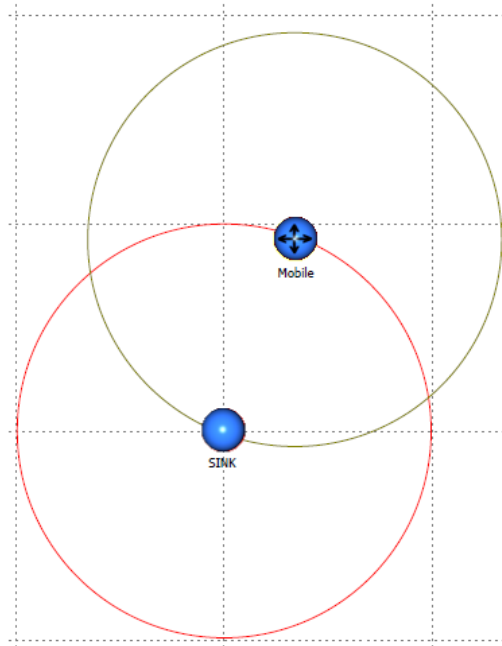


Figure 2-1 Réseau avec un seul saut

- Cas 2 : plusieurs nœuds capteurs mobiles et un puits fixe, les nœuds mobiles étant en position relative fixe (ils bougent tous ensemble uniformément) et assumant pour certains la seule fonction de capteur –émetteur, pour d’autres les fonctions de capteur – émetteur et de relais et pour d’autres la seule fonction de relais ; le réseau comprend alors une partie embarquée avec une topologie spécifique ; la liaison mobile-fixe est réalisée entre un des nœuds relais mobiles, celui-ci n’étant pas toujours le même au cours du temps, et le puits (Figure 2-2).

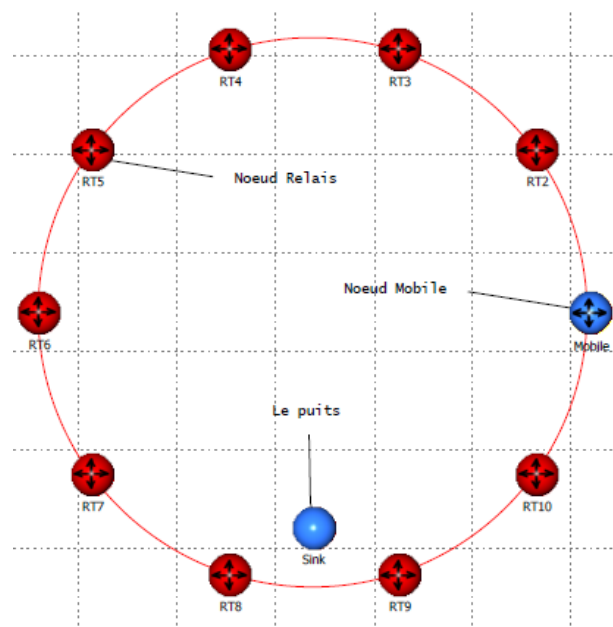


Figure 2-2 Réseau avec relais embarqués

- Cas 3 : plusieurs relais « au sol » afin que la liaison mobile-fixe soit réalisée de manière optimale entre chaque nœud capteur et un des nœuds relais situés au sol, celui-ci n'étant pas toujours le même au cours du temps, et un ensemble de relais au sol assurant l'acheminement des paquets jusqu'au puits (Figure 2-3).

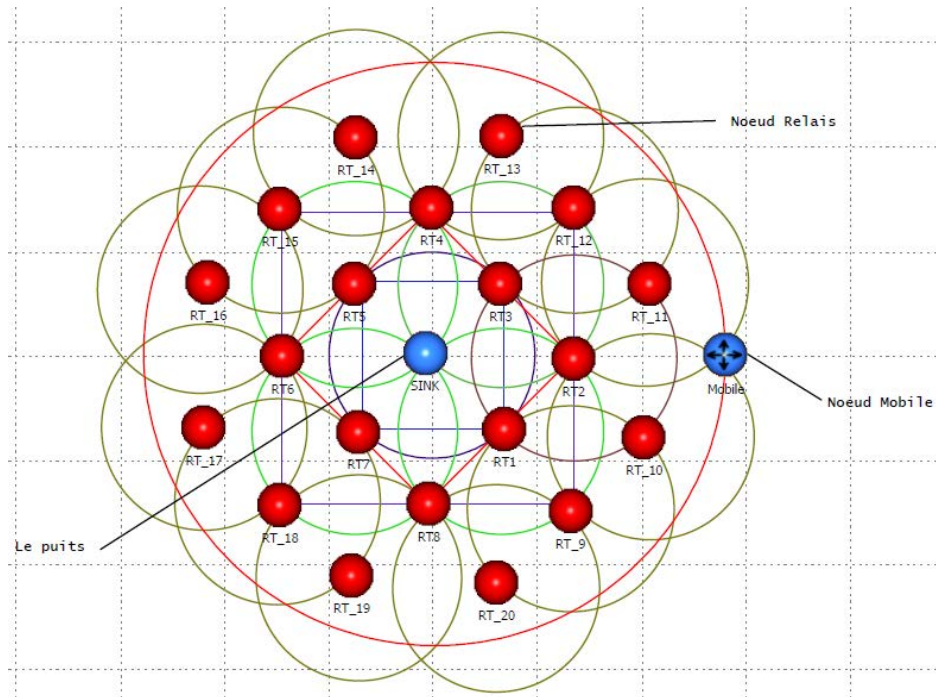


Figure 2-3 Réseau avec relais au sol

Le cas 1 est trivial, mais ne peut pas souvent être utilisé. Certains systèmes et certaines trajectoires imposent soit le cas 2 soit le cas 3. Pour d'autres systèmes et trajectoires, les cas 2 et 3 sont des alternatives fonctionnelles. Il convient alors de déterminer la meilleure des solutions.

Le contrôle de la topologie, obtenu en modifiant la puissance d'émission, sera utilisé notamment pour s'affranchir de certaines contraintes physiques ne permettant pas de placer les nœuds aux meilleurs endroits.

Enfin il serait certainement efficace d'utiliser des antennes directives pour contrôler encore plus précisément la topologie. Mais cette éventualité ne sera pas explorée dans cette thèse afin de limiter l'étendue de l'étude.

Le routage

Le routage détermine le chemin des paquets pour aller du nœud capteur mobile jusqu'au puits fixe. Il faut remarquer que seul le routage dans le sens capteur vers puits sera considéré. Pourtant le routage puits vers capteur a un sens dans ce type d'application si on veut pouvoir changer les paramètres de mesure en ligne. Ceci pourra constituer une suite à ce travail de thèse.

Tout algorithme de routage est basé sur une ou plusieurs métriques. Dans les réseaux de capteurs sans fil, la position du nœud vis-à-vis du puits, nombre de sauts ou coût, ainsi que l'énergie résiduelle sont les deux métriques souvent utilisées pour le routage. L'énergie n'est pas un élément critique dans le scénario étudié car l'installation du réseau est temporaire, le nombre de nœuds est limité et ceux-ci sont accessibles. Ainsi les batteries peuvent être rechargées s'il le faut.

Le transfert entre le nœud capteur et le puits n'est pas direct dans le cas général où les deux nœuds ne sont pas reliés directement en permanence par une liaison radio. Les paquets doivent alors être relayés par des nœuds intermédiaires suivant le principe des réseaux ad-hoc. C'est l'application qui fixe la qualité de service requise dans le transport des informations et par conséquent la ou les métriques de routage. L'application de surveillance, qui fonctionne en temps réel et qui peut requérir une certaine synchronisation des données saisies, impose donc un délai minimisé. Dans ce cas, cela fixe la métrique au nombre de sauts, critère à minimiser. Cette minimisation doit se faire sous la contrainte d'un très faible taux de perte de paquet. Donc seules les liaisons fiables doivent être prises en compte. La position du capteur changeant constamment, la topologie du réseau change ce qui implique qu'un routage dynamique est nécessaire. Pour répondre au niveau de qualité de service désiré, la vitesse du nœud capteur doit aussi être prise en compte en plus de la position. Cette vitesse permet d'anticiper le changement de topologie durant le transfert du paquet à travers le réseau et le changement majeur de qualité de la liaison mobile-fixe.

Il est possible que volontairement ou non un paquet soit transféré sur plusieurs chemins. Le routage multi-chemin présente des avantages si les chemins sont suffisamment disjoints pour ne pas créer d'interférences entre les nœuds émetteurs; ce que permettent certaines topologies. C'est l'utilisation d'un seul canal qui induit ces interférences entre chemins rapprochés. Dans le cas d'un routage multi-chemin, il convient de mettre en place un protocole de transport minimal pour éliminer les paquets reçus en plusieurs copies par le puits.

Enfin, certaines topologies et certains algorithmes de routage permettent facilement de réaliser de l'agrégation de paquets. Cette possibilité pourra être considérée et sa pertinence évaluée.

La localisation

La localisation d'un nœud est souvent nécessaire dans un réseau de capteurs pour deux usages : au niveau applicatif, pour associer une position aux valeurs mesurées par le ou les capteurs; au niveau routage si un algorithme de routage géographique est utilisé. Dans le cas d'un réseau de capteurs mobiles comme celui étudié, la localisation est une fonctionnalité fondamentale pour les deux usages cités précédemment. Comme décrit dans le paragraphe 2.6.5, de nombreuses techniques de localisation ont été développées. Mais la plupart considère un emplacement aléatoire du nœud. Dans notre cas, le nœud à localiser se trouve sur une trajectoire connue. De plus, il est mobile, il y a donc possibilité d'exploiter le mouvement pour réaliser la localisation. Enfin, la trajectoire étant parcourue cycliquement, la localisation peut s'appuyer sur une technique d'apprentissage.

Ces considérations ont été prises en compte pour proposer quelques solutions adaptées. Notons aussi que l'utilisation d'antennes directives pourrait contribuer à améliorer la vitesse de localisation et sa précision.

2.6 Positionnement des travaux

2.6.1 Les réseaux de capteurs sans fil

2.6.1.1 Généralités

Un réseau de capteurs est constitué de milliers de nœuds appelés nœuds capteurs ou tout simplement capteurs, permettant de capter et collecter des informations, d'analyser les traitements et de transmettre les informations recueillies dans différents environnements. Ces nœuds peuvent avoir des positions particulières ou bien être déployés aléatoirement pour surveiller l'environnement. Les communications dans un réseau de capteurs se font souvent d'une manière multi-saut.

L'écoulement des données se termine vers des nœuds spéciaux appelés nœuds-puits ou stations de base (« sink »). Ces nœuds-puits sont des bases de contrôle qui possèdent plus de ressources matérielles et permettent de collecter et stocker les informations issues des capteurs.

En d'autres termes le fonctionnement d'un réseau de capteurs se déroule de la manière suivante : les nœuds sont déployés dans une zone appelée zone d'intérêt pour la surveiller. Lorsqu'un nœud détecte un événement, il le traite localement et l'achemine vers la station de base via une communication multi-saut. Ce processus est illustré dans la Figure 2-4.

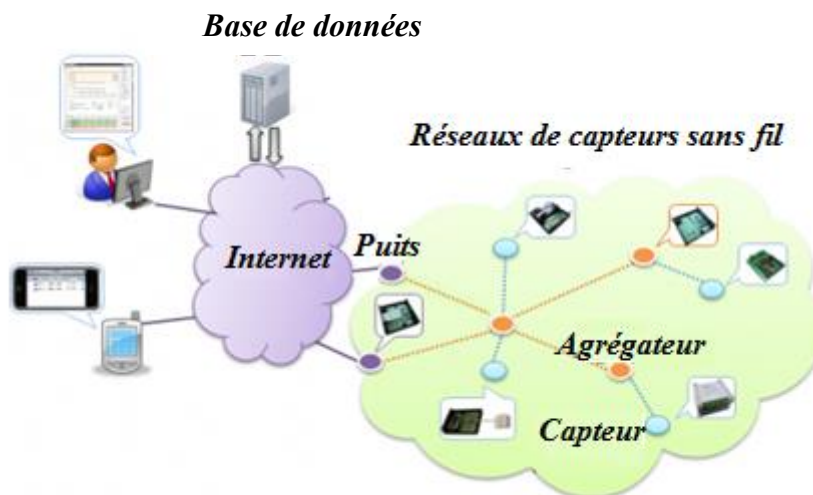


Figure 2-4 Exemple d'un réseau de capteurs

Caractéristiques des RCSF

Les caractéristiques les plus remarquables des RCSF, sont les suivantes :

- Absence d'infrastructure, ce sont des réseaux Ad-hoc ;
- Facteur d'échelle – Le nombre de nœuds déployés pour une application peut atteindre des milliers ;
- Interférences si deux nœuds proches émettent simultanément ;
- Topologie dynamique, due à la défaillance de nœud ou à l'ajout de nouveaux nœuds au réseau déjà déployé ou à la mobilité de nœud(s). Les capteurs peuvent également être

attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire rendant ainsi la topologie du réseau fréquemment changeante.

- Sécurité physique limitée – les réseaux de capteurs sans fil sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.
- Bande passante assez faible ;
- Contrainte de ressources : énergie, de stockage et de calcul - la caractéristique la plus critique dans les réseaux de capteurs est la modestie de ses ressources énergétiques, car chaque nœud est autonome et alimenté par une batterie.

Caractéristiques d'un nœud capteur

Un nœud capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une grandeur physique (température, lumière, pression, etc.) et de la communiquer à un centre de collecte directement ou via d'autres nœuds qui fonctionnent alors comme des routeurs. Les progrès conjoints de la microélectronique, des technologies de transmission sans fil et des logiciels ont permis de produire à coût raisonnable des microcapteurs de quelques millimètres cubes de volume, susceptibles de fonctionner en réseau (Kahn et al., 1999).

Un nœud capteur est composé de quatre unités de base et de deux unités optionnelles (voir Figure 2-5):

L'unité d'acquisition : elle est généralement composée de deux sous-unités qui sont les capteurs et les convertisseurs analogique-numérique (ADC).

L'unité de traitement : sous le contrôle d'un système d'exploitation, elle exécute le programme écrit par l'utilisateur qui se traduit par la réalisation de tâches d'acquisition de grandeur via un capteur, de traitement de données acquises et d'émission vers le nœud collecteur ; de plus, elle assure le routage de paquets reçus destinés à d'autres nœuds.

Un module de communication (Transceiver) : il est composé d'un émetteur/récepteur permettant la communication entre les différents nœuds du réseau via une liaison radio.

La batterie : elle alimente l'ensemble des unités du nœud

Le « Mobilisateur » (Mobilizer) : optionnel, il est utilisé pour déplacer le nœud pour accomplir la tâche à traiter.

Le système de localisation (Location Finding System) : optionnel, il fournit des informations sur la localisation requise par l'application et/ou le routage.

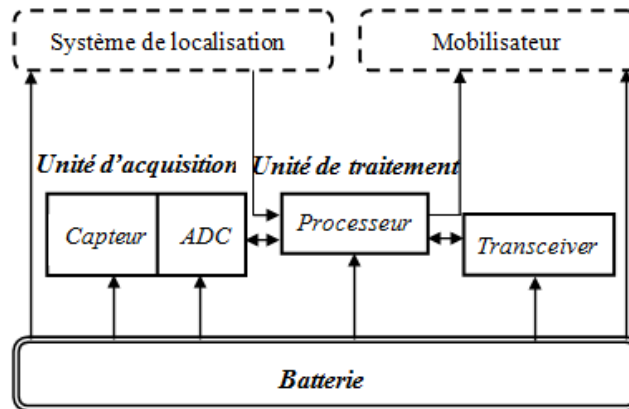


Figure 2-5 Les composants d'un nœud capteur

2.6.1.2 Types de RCSF

Dans beaucoup de cas, tous les nœuds du réseau de capteurs sont fixes. Répartis uniformément ou aléatoirement, les nœuds sont séparés les uns des autres par des distances qui leur permettent de communiquer au moins avec un de leurs plus proches voisins. La connectivité est totale si tous les nœuds peuvent trouver un chemin jusqu'au puits. Un réseau stationnaire est constitué de nœuds capteurs fixes dédiés dans la plupart du temps à la surveillance d'occurrences d'événements dans une zone géographique (Ringwald et al., 2005; Yang et al., 2004). Dans ce cas, le réseau n'effectue que la surveillance et les données capturées sont transmises en mode multi-sauts au nœud collecteur. Ce dernier est chargé, après réception de l'information, de mettre en œuvre les actions nécessaires. Il peut être connecté, de manière filaire à un autre réseau (Rajaravivarma et al., 2003).

Si la densité de répartition spatiale des nœuds est trop faible, la connectivité n'est pas totale. Il est possible, si l'application le permet, qu'un puits mobile vienne se placer de temps en temps dans le rayon de communication de chaque nœud capteur et que celui-ci lui envoie alors les informations qu'il a saisies et enregistrées depuis la dernière communication. Le délai entre la saisie de l'information et son transfert est grand et ce type de réseau est qualifié de tolérant au délai (en anglais, DTN : Delay Tolerant Network).

L'application pour laquelle le réseau de capteurs est déployé peut inclure un système mobile porteur d'un ou plusieurs nœuds du réseau. Le réseau est alors un réseau de capteurs mobiles, Mobile Wireless Sensor Network ou MWSN en anglais. Ces réseaux exploitent à leur avantage la capacité d'une ou plusieurs liaisons sans fil à réaliser facilement une liaison entre un mobile et une partie fixe. La topologie du réseau est changeante, la liaison mobile – fixe changeant de nœud au cours du déplacement du mobile. Il faut donc gérer le routage avec la dynamique adaptée. Il faut particulièrement gérer le « handover » consistant pour le mobile à changer de « base », c'est-à-dire de correspondant direct sur la partie fixe. Ce changement n'est pas possible en cours d'émission de paquet et doit donc être anticipé pour éviter les pertes de paquet. La localisation du mobile, dont la problématique est discutée dans un paragraphe suivant, constitue alors une fonction primordiale tant pour le fonctionnement du réseau que pour caractériser les données captées.

Un RCSF peut aussi être typé par le type de données captées et transportées. Lorsque ce sont des images ou de la vidéo, le réseau est appelé Réseau de Capteurs Multimédia, Wireless

Multimedia Sensor Network ou WMSN en anglais. Le flux d'information généré est alors grand et il est tentant de compresser fortement les images ou la vidéo. Une problématique consiste à optimiser globalement l'énergie dépensée à la compression des données et à leur transport (Duran-Faundez et al., 2011).

2.6.1.3 Domaines d'application d'un RCSF

Applications militaires : La surveillance de territoire ou de frontière à des fins militaires a été la première application des réseaux de capteurs. Dans le même objectif militaire, des nœuds capteurs peuvent être dispersés sur un terrain adverse afin de l'analyser avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou radioactifs).

Applications environnementales : Les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour surveiller les changements environnementaux accidentels ou naturels (Loureiro et al., 2007). Dans (Werner-Allen et al., 2006) les auteurs décrivent la mise en œuvre d'un réseau de capteurs sur le volcan « Reventator » dans la partie occidentale de l'Amazonie en Équateur. Les données recueillies au cours des déplacements sont transmises à un satellite tandis que des nœuds sont toujours à la surface. La durée de vie espérée des nœuds est d'environ 45 ans. Ils peuvent être aussi utilisés pour surveiller des animaux.

Applications médicales : Les capteurs peuvent être implantés dans ou sur le corps pour surveiller un patient et son état de santé. Dans (Chintalapudi et al., 2006), les auteurs ont réalisé un réseau de capteurs pour la surveillance des « signes vitaux ».

Applications en génie civil : les capteurs peuvent être utilisés pour contrôler les vibrations susceptibles d'endommager la structure d'un bâtiment, d'un pont ou d'un barrage. Dans (Herring et al., 2000), les auteurs décrivent une application qui surveille l'état de grandes structures comme des immeubles administratifs.

Applications en domotique : les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour détecter les intrusions, capter la température, et toute information utile pour assurer confort et sécurité dans une maison.

Applications en agriculture : les capteurs mesurent l'humidité du sol ou d'autres paramètres sur la culture afin d'irriguer ou traiter avec précision les seuls endroits nécessaires.

Autres applications : en industrie, les capteurs peuvent remplacer les puces RFID pour contrôler les stocks de produits, contrôler les flux, surveiller des équipements ; en urbanisme, les capteurs peuvent détecter les déplacements, compter les véhicules, détecter les matières dangereuses dans le circuit d'alimentation en eau,...

2.6.1.4 Consommation d'énergie dans un RCSF

Un problème souvent majeur dans les réseaux de capteurs est la consommation d'énergie puisque les nœuds sont autonomes. Dans certains cas, le remplacement de la batterie est impossible, ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend de la durée de vie de sa batterie.

Toutefois, ce problème est moins crucial si les nœuds sont facilement accessibles et déployés pour une courte durée comme c'est le cas dans l'application principale visée par ces travaux de thèse. Si le système doit être utilisé sur une longue durée, il faut optimiser les échanges et les traitements. L'utilisation de *Duty cycle*, c'est-à-dire la mise en veille régulière des nœuds,

constitue la solution la plus économe en énergie. Mais elle est diminuée les performances et n'est donc pas compatible avec toutes les applications.

2.6.2 Monitoring à l'aide d'un réseau de capteur

L'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil – RCSF - pour la surveillance est bien connue dans des domaines comme la défense militaire, l'environnement, les infrastructures de génie civil, souvent comme des dispositifs supplémentaires à des réseaux de capteurs câblés existants. Par exemple un RCSF de surveillance de l'état de la structure a été conçu, implémenté, déployé et testé sur l'arche principale longue de 1275 mètres et la tour Sud du *Golden Gate Bridge* (Kim et al., 2007). Des RCSF sont utilisés de la même manière pour la surveillance de maisons ou immeubles et pour la surveillance de la santé de personnes (Akyildiz et al., 2002). Ces scénarios sont vraiment différents de celui qui motive ce sujet de recherche, car presque tout le système surveillé est statique ainsi que tous les nœuds du réseau de capteurs. Des scénarios de surveillance avec des nœuds mobiles connectés à l'aide de technologies sans fil ont été développés dans les projets Cartel du MIT (Hull et al., 2006) et MobEyes de l'UCLA (Lee, U. et al., 2006) en utilisant des réseaux VANET (Vehicular Adhoc Network). Mais cette surveillance est adaptée aux réseaux tolérants les délais ou DTN (Delay Tolerant Network) avec un lien non permanent entre un nœud et le puits. De plus les nœuds sont puissants en comparaison de ceux du réseau de capteurs sans fil mobile utilisé dans l'architecture étudiée dans cette thèse.

La surveillance de machines en utilisant des RCSF n'est pas fréquemment investiguée dans les publications scientifiques. Mais quelques RCSF spécifiques dédiés aux systèmes automatisés industriels ont été développés par des fabricants de réseaux industriels (Christin et al., 2010). Ils sont basés sur des protocoles standards de réseaux de capteurs sans fil, mais avec des particularités renforçant la qualité de service et la sécurité. La majorité des contributions mettent l'accent sur l'application et utilisent des RCSF simples. Certaines applications utilisent la capacité des liaisons sans fil pour réaliser la communication mobile-fixe dans la surveillance de moteurs électriques (Lu et al., 2009), (Lima-Filho et al., 2012) mais d'autres concernent des systèmes plus globaux avec l'objectif d'optimiser l'énergie consommée (Salvadori et al., 2009) ou pour surveiller des machines-outils et particulièrement l'usure des outils (Tan et al., 2009). En raison du faible nombre de sauts dans ces réseaux les contributions visant à améliorer la qualité de service pour satisfaire les exigences des usages industriels sont concentrées sur la couche MAC (Medium Access Control) comme l'indique l'état de l'art réalisé par (Yigitel et al., 2011). Selon celui-ci, la majorité des protocoles résultants suivent une approche de différenciation de services. Les paquets sont traités suivant leur classe et les exigences correspondantes en réglant les paramètres du réseau au niveau de la couche MAC.

Les nœuds de RCSF peuvent avoir des défaillances qui affectent la qualité de la surveillance. La localisation des capteurs en défaut a été étudiée par (Chen et al., 2006).

En conclusion aucune contribution n'a été trouvée concernant spécifiquement la surveillance de grandes machines à l'aide d'un réseau de capteurs.

2.6.3 Topologie de réseau de capteurs

La topologie physique des réseaux de capteurs dépend du modèle de déploiement, aléatoire ou déterministe. Le choix de ce modèle est réalisé en fonction de la difficulté de réalisation de ce déploiement, liée à la taille du réseau et à l'accessibilité de la zone de déploiement.

Les études sur le déploiement physique visent généralement à déterminer la couverture du réseau en termes de détection d'événements.

La topologie logique détermine souvent les qualités et performances du réseau. (Mamun, 2012) a réalisé une comparaison détaillée de quatre types de topologies logiques en utilisant dix métriques différentes. Les quatre topologies sont :

- La topologie à plat ou non organisée, dans laquelle tous les nœuds ont le même rôle et le routage déterminé à chaque émission, donc en utilisant de la diffusion non adressée ;
- La topologie en cluster dans laquelle les nœuds sont organisés en groupes et le routage organisé à priori en choisissant un « chef » de cluster qui est une sorte de puits intermédiaire pour son groupe ;
- La topologie en arbre qui est une construction obtenue par les routes créées et mémorisées depuis chaque nœud capteur vers le puits qui est la racine de l'arbre ;
- La topologie en chaîne dans laquelle les nœuds forment une ou plusieurs chaînes passant par le puits.

Les dix métriques retenues pour cette comparaison sont : l'énergie totale consommée, la distribution de l'énergie, la distribution de la charge, la redondance des communications, la fiabilité des données, le passage à l'échelle, le délai d'acheminement, la connectivité du réseau, la durée de vie et le coût de gestion de la topologie.

Le contrôle de la topologie par réglage de la puissance d'émission ou par mise en sommeil de certains nœuds a aussi été bien étudié. Dans le premier cas, l'objectif est soit l'économie d'énergie soit le fonctionnement optimal du réseau. De ce point de vue, il y a du pour et du contre à l'augmentation du rayon de transmission. Celle-ci réduit le nombre de sauts pour atteindre le puits et donc diminue le délai d'acheminement et parfois l'énergie consommée. Mais le nombre de contentions entre émissions augmente fortement ce qui réduit le débit et augmente le délai. Selon (Kleinrock et al., 1978), le nombre optimal de voisins dans un réseau stationnaire est six. Dans un réseau avec des nœuds mobiles, il n'y a pas d'optimum global. Il a été montré que le meilleur taux de délivrance des paquets est obtenu avec un rayon de transmission proportionnel à la vitesse de mobilité du ou des nœuds impliqués (Royer et al., 2001).

Dans le deuxième cas, l'objectif est toujours d'économiser de l'énergie et de prolonger la vie du réseau. Par exemple, le protocole GAF (Geographical Adaptive Fidelity) (Hull et al., 2006) exploite le positionnement déterminé des nœuds sur une grille pour mettre en sommeil temporairement des nœuds sans perte de performance dans le routage des paquets. Les protocoles DMAC, S-DMAC et CC ne préjugent pas du positionnement, mais forment des clusters et un backbone résistants à la disparition temporaire ou permanente de nœuds (Basagni et al., 2008).

La mobilité ne peut pas être réduite à sa vitesse. La trajectoire est bien sûr très influente et des modèles de mobilité ont été étudiés. Ces modèles sont essentiellement utilisés pour améliorer le routage en anticipant les modifications de topologie ou en faisant des hypothèses sur la topologie actuelle connaissant celle du passé. Le parcours répétitif d'une trajectoire

comme défini dans le scénario étudié peut aussi être utilisé pour anticiper la modification de topologie en préparant les paramètres du protocole de transport pour diminuer sa sensibilité au *handover*, c'est-à-dire le changement de nœud fixe lié par canal radio avec le mobile (Bertaux, 2013).

2.6.4 Routage dans un réseau de capteurs mobiles

Tout algorithme de routage est basé sur une ou plusieurs métriques. Dans les réseaux de capteurs, la position du nœud vis-à-vis du puits, nombre de sauts ou coût, ainsi que l'énergie résiduelle sont les deux métriques souvent utilisées pour le routage. Les méthodes de routage sont nombreuses et seules celles utilisables dans des réseaux mobiles sont considérées. Ces méthodes sont inspirées de deux domaines : celui des réseaux de capteurs et celui des réseaux ad-hoc mobiles (MANET). Les protocoles de routage des réseaux de capteurs ont parfois des problèmes d'adaptation au changement rapide de la topologie du réseau. D'un autre côté, les protocoles de routage des MANET, bien adaptés à la mobilité, sont pour la plupart conçus pour des communications bidirectionnelles, ce qui n'est pas une fonctionnalité requise dans le scénario retenu.

Les protocoles dédiés aux réseaux de capteurs mobiles sont presque tous des adaptations de protocoles existants. Par exemple ADSR (Angle-based Dynamic Source Routing) (Kwangcheol et al., 2011) est une adaptation du protocole pour réseau sans fil maillé DSR (Dynamic Source Routing). ADSR utilise l'information de position pour estimer l'angle entre le nœud source, les nœuds relais potentiels et le puits. Cette information est ensuite utilisée pour router les paquets constamment en direction du puits. De même, LEACH-M (Low energy Adaptative clustering Hierarchy –Mobile) (Renugadevi et al.) est une adaptation du protocole LEACH pour réseau de capteurs. Le problème majeur avec cette approche hiérarchique est que le ou les nœuds mobiles changent fréquemment de cluster. Cela crée de nombreux échanges pour ré-attacher ce ou ces nœuds au(x) nouveau(x) cluster(s).

Parmi tous les protocoles de routage, ceux utilisant la position géographique comme métrique sont attractifs en raison de leur simplicité et leur passage à l'échelle. En routage géographique (Mauve et al., 2001), un nœud transfère simplement le paquet vers un autre nœud pour que le paquet s'approche du puits destinataire en termes de distance géographique. Ce routage géographique de base, nommé routage glouton car la solution choisie est la meilleure localement, est simple, car il ne nécessite pas de maintien de table de routage ni de connaissance de la topologie globale du réseau. Toutefois, l'absence d'information globale conduit parfois le paquet vers des trous ou vers des obstacles. Ainsi le nœud atteint ne peut plus router le paquet vers sa destination avec ce routage, car aucun nœud plus proche de la destination n'est accessible.

Ce problème peut être facilement évité par une stratégie de contournement surtout lorsque la destination est toujours située au même endroit. Ainsi les variantes sont nombreuses en routage géographique. ZBR (Zone Based Routing) proposé par (Ahmed et al., 2011) qui définit des clusters géographiques permet d'attacher facilement le nœud mobile à un cluster en utilisant sa position. GOR (Geographically Opportunistic Routing) (GOR) proposé par (Han et al., 2012) est un protocole pour topologie logique à plat qui projette le réseau sur une grille et qui utilise l'information géographique pour transmettre le paquet le plus loin possible vers la destination quand c'est possible.

Les auteurs (Zhao et al., 2006) améliorent le routage géographique dans les réseaux mobiles pour véhicules (VANET) en utilisant une prédiction de la mobilité à partir du plan local des routes et du trafic routier actuel. Ce concept d'utiliser la future position est vraiment intéressant pour l'étude menée dans cette thèse.

Le routage géographique apparaît donc comme approprié pour des topologies connues avec une mobilité prédictible. Il sera utilisé avec des adaptations dans les architectures proposées dans cette thèse.

2.6.5 Localisation des nœuds

2.6.5.1 Introduction : les différentes méthodes

La localisation d'un nœud mobile est devenue une fonctionnalité importante dans des réseaux très divers et pour des terminaux comme les smartphones, les véhicules connectés en VANET, les nœuds de réseaux de capteurs, etc... La localisation en extérieur est souvent basée sur le système GPS (Global Positioning System), car il est relativement précis et peu cher. Son coût énergétique est en revanche élevé, à cause de la détection des satellites et de la synchronisation de l'horloge avec les satellites les plus proches. Ceci entraîne donc la diminution de la durée de vie effective de l'ensemble du réseau. La localisation en intérieur ne peut pas s'appuyer sur le GPS, car les signaux sont trop faibles et non en ligne directe. Diverses techniques ont été développées qui vont être présentées rapidement dans ce paragraphe. En raison de la diversité et de la complexité des techniques de localisation, dont aucune n'est universelle ni totalement satisfaisante, la présentation est ici réduite à un résumé inspiré en partie de la thèse de Mustapha Dakkak (Dakkak, 2012), et complétée pour les mobiles.

2.6.5.2 Localisation en extérieure par un GPS

Le GPS est un système de positionnement terrestre comprenant 24 satellites mobiles sur une orbite à 20 200 km d'altitude (Duquenne et al., 2005). Un récepteur GPS qui capte les signaux d'au moins quatre satellites équipés d'horloges atomiques peut, en calculant les temps de propagation de ces signaux entre les satellites et lui, connaître sa distance par rapport à ceux-ci et, par trilatération, se situer en trois dimensions avec une précision de 3 à 50 mètres pour le système standard. Le GPS est ainsi utilisé pour localiser des piétons, des véhicules roulants, des navires et des avions.

Ces satellites émettent en permanence des signaux sur deux fréquences porteuses, une à 1 575,42 MHz et l'autre à 1 227,60 MHz. Sur la première, le signal de modulation est une séquence résultant de l'addition modulo 2 d'un code pseudo-aléatoire appelé C/A (Coarse Acquisition) à 1,023 Mb/s et des données à 50 b/s contenant les éphémérides des satellites (données servant à calculer leur position) et d'autres informations de navigation. C'est ce signal qui est à usage civil. C'est le code C/A qui sert dans les récepteurs à déterminer l'instant exact d'émission du signal.

La plupart des récepteurs sont capables d'affiner leurs calculs en utilisant plus de quatre satellites, ce qui rend les résultats des calculs plus précis, tout en évitant les sources peu fiables ou trop proches l'une de l'autre pour fournir une mesure correcte. De même le **GPS différentiel** (en anglais *Differential Global Positioning System* : **DGPS**) améliore la précision de localisation. Il utilise un réseau de stations fixes de référence qui transmet l'écart entre les positions indiquées par les satellites et leurs positions réelles connues. Le récepteur peut ainsi

corriger ses mesures de positions. Les meilleures implémentations offrent des précisions de moins de 10 cm.

Cependant, le GPS n'est pas utilisable dans toutes les situations, le signal émis par les satellites étant assez faible et différents facteurs peuvent affecter la précision de la localisation : présence de gouttes d'eau dans l'air, masquage total ou partiel par des feuilles d'arbres, occultation d'un satellite par « effet canyon » (montagne ou simplement bâtiment). À noter que dans ce cas un écho du signal contre une surface n'empêchera pas la localisation, mais fournira une localisation fausse : c'est le problème des multitrajets des signaux GPS. D'autres erreurs, n'ayant pas de corrélation avec le milieu de prise de mesure ni la nature atmosphérique, peuvent être présentes. Ce sont des erreurs systématiques dues essentiellement aux mauvaises synchronisations d'horloge.

Un composant récepteur est assez petit et son coût avec antenne reste modeste (30 euros HT en 2014). Le GPS est certainement une bonne solution de localisation pour notre scénario dans le cas d'un système opérant en extérieur.

2.6.5.3 Les techniques Range-based

Les techniques de localisation Range-Based sont fondées sur la mesure de la distance ou des angles entre les directions à des nœuds de référence appelés ancres.

Figure 2-6 montre un réseau constitué d'ancres et de nœuds qui doivent se localiser. Les ancres (C1, C2, et C3) possèdent des informations précises sur leur position (via GPS, intervention humaine..) et les nœuds restants (N1, N2, N3 et N4) mesurent leurs distances ou leurs angles par rapport aux ancres. Ils appliquent ensuite des techniques de multilatération, décrite dans le paragraphe suivant, afin d'estimer leur emplacement. À noter que le nombre d'ancres utilisées est généralement légèrement plus grand que le nombre nécessaire, ce qui conduit à résoudre un système surdimensionné et donc à minimiser une erreur d'estimation pour obtenir la position.

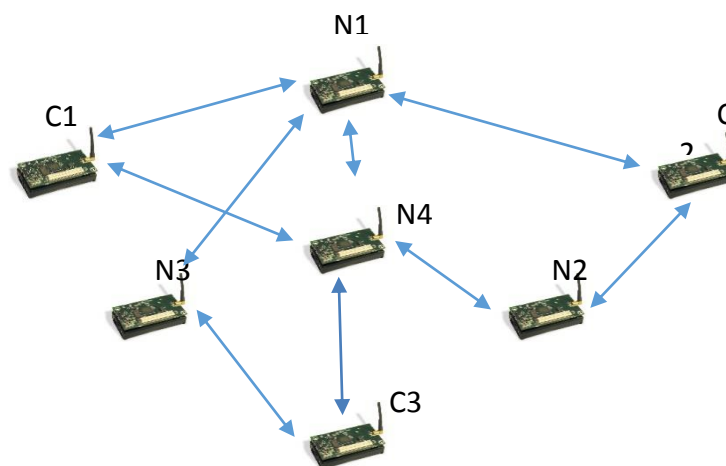


Figure 2-6 Localisation à l'aide d'ancres

Techniques basées sur la distance

- Principe de la localisation par mesure de distances : la trilatération

La trilatération est une méthode mathématique permettant de déterminer la position relative d'un point en utilisant la géométrie des triangles tout comme la triangulation. Mais contrairement à cette dernière qui utilise des angles (voir paragraphe suivant), la trilatération utilise les distances entre ce point et au minimum deux points de références.

Chaque mesure de distance définit un cercle autour de l'ancre avec un rayon égal à la mesure et sur lequel le nœud doit se situer. L'intersection de deux cercles, par exemple sur la Figure 2-7 ceux tracés autour de A2 et A3, donne deux points. En l'absence d'information de direction, un troisième cercle comme celui tracé autour de A1 permet de déterminer l'emplacement exact du nœud. Mais cela suppose que les mesures de distance soient parfaites, ce qui n'est pas le cas. Le point d'intersection des trois cercles n'existe donc pas, il doit donc être estimé.

Les coordonnées (x,y) de nœud N sont liées aux distances et coordonnées connues des ancres par (2-1):

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (2-1)$$

Ainsi, la différence entre les distances mesurées et réelles peuvent être représentés comme :

$$\rho_i = \hat{d}_i - d_i \quad (2-2)$$

Par conséquent, plus de trois nœuds sont nécessaires pour une meilleure précision de localisation.

Le problème de minimisation des moindres carrés permet de déterminer (x,y) qui minimise $\sum_{i=1}^n (\rho_i)^2$. Ce problème peut être résolu par l'utilisation de la technique de descente de gradient ou par des techniques itératives d'approximations successives.

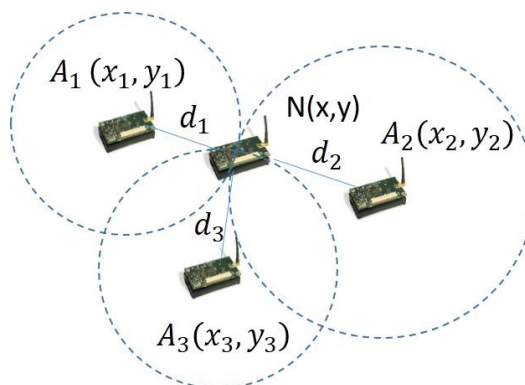


Figure 2-7 Localisation à base de distance par trilatération

Mesure du RSSI « Received Signal Strength Indication »

La mesure de la puissance d'un signal radio reçu ou RSSI est très simple, gratuite et non intrusive. Chaque nœud peut mesurer la puissance du signal reçu pour chaque paquet de données entrant sans impacter ni la bande passante ni l'énergie. Une estimation de la distance entre l'émetteur du paquet et le récepteur est obtenue à partir de cette puissance du signal reçu en connaissant la puissance du signal émis et le modèle d'atténuation utilisé « Path loss ». Le modèle le plus utilisé est basé sur le log normal shadowing :

$$P_R = P_T - 10\eta\log(D) + R + X_\sigma \quad (2-3)$$

avec P_R la puissance reçue et mesurée en dBm, P_T la puissance du signal transmise en dBm, η est la constante d'atténuation dépendante du milieu de propagation de valeur comprise entre 2 et 6, K une constante dépendante de la fréquence et du milieu de propagation et X_σ le facteur d'incertitude due aux trajets multiples, aux variations de propagation surtout en environnement mobile et à l'ombrage. De plus (Heurtefeux et al., 2012) mettent en avant l'anisotropie due aux antennes pour expliquer l'imprécision, ce qui revient à exprimer que P_T est connue avec une grande incertitude. Enfin, P_T est liée entre autre à la charge de la batterie de l'émetteur, variable dans le temps.

En conclusion, il est impossible dans le cas général d'obtenir une mesure précise de la distance entre deux nœuds à l'aide du RSSI. L'erreur est telle que les différentes méthodes d'estimation de la position à partir des mesures de distances réalisées avec un nombre surabondant d'ancres ne permettent pas d'obtenir un résultat satisfaisant. Toutefois la mesure du RSSI a un intérêt en l'associant aux techniques *Range-free* décrites au paragraphe 2.6.5.4.

- Mesure du temps d'arrivée

La technique TOA (Time of Arrival) parfois appelée TOF (Time Of Flight) est basée sur la mesure précise du temps écoulé entre l'émission et la réception d'un signal. Ces mesures sont utilisées pour estimer la distance en se basant sur le temps de propagation et la vitesse du signal. Deux cas sont envisagés:

- mesures aller-retour : le signal reçu par le nœud à positionner est renvoyé immédiatement à l'ancre émettrice qui mesure à la réception le temps écoulé Δ depuis l'émission. La distance est calculée dans chaque ancre i par :

$$d_i = \left(\frac{1}{2} \Delta t_i - \tau\right)c \quad (2-4)$$

Avec c la célérité et τ le temps de retournement, c'est-à-dire la durée entre la réception du signal dans le nœud à positionner et sa réémission. Ce temps doit être estimé par étalonnage.

- mesures aller : dans ce cas, l'émetteur envoie un signal horodaté précisément au moment de l'envoi. Le récepteur relève précisément l'heure d'arrivée du signal. Ainsi, avec une simple soustraction il peut déduire le temps de vol à condition que les horloges de l'émetteur et du récepteur soient parfaitement synchronisées. La distance qui sépare le nœud N_i du nœud N s'écrit comme suit :

$$d_i = \Delta t * c \quad (2-5)$$

Dans les deux cas, la distance calculée est affectée par l'imprécision des horloges et la nature de l'environnement. Toute petite erreur dans la mesure du temps entraîne une erreur importante d'estimation de distance à cause de la vitesse de propagation élevée des signaux radio dans l'air. Les techniques de ToA sont peu envisageables pour les réseaux de capteurs traditionnels, et surtout dans le cas des nœuds mobiles s'ils n'ont pas de synchronisation avec les autres nœuds fixes. Toutefois dans les environnements difficiles comme sous l'eau dans lesquels la vitesse de propagation est faible les techniques de ToA peuvent être plus appropriées, sans oublier le nouveau type de radio UWB.

- UWB-RF : Ultra Wide Band

La technologie de couche physique UWB-RF a connu un grand essor au cours de cette dernière décennie. Elle est caractérisée par une grande largeur de bande par rapport à la fréquence centrale des ondes émises. Il y a deux facteurs derrière le concept UWB : la bande passante relativement large et une fréquence centrale relativement petite. La grande largeur de bande permet des résolutions temporelles précises. La basse fréquence centrale quant à elle devrait permettre un meilleur passage des ondes à travers les différents matériaux.

Divers systèmes de localisation ont été testés sur les radios UWB et semblent donner des résultats très prometteurs (Dalce et al., 2012). Néanmoins nous n'avons pas des nœuds équipés de dispositif UWB. Il semble que cette technologie en soit encore au stade expérimental.

- Mesure de la différence des temps d'arrivée

La différence entre les moments de réception de plusieurs signaux distincts (Time Difference Of Arrival, TDOA) peut être employée pour estimer la distance entre les nœuds. Les techniques de TDoA peuvent être classées en deux catégories :

- Plusieurs nœuds, même type de signal : un signal émis par le nœud à localiser est reçu par trois ancres synchronisées qui relèvent les heures d'arrivée. La différence entre deux heures d'arrivée définit un hyperboloïde sur lequel le nœud N devrait se trouver et l'intersection des trois hyperboloïdes définit la position. Cette technique est utilisée par les sismographes pour localiser un séisme.
- Plusieurs signaux : deux signaux qui ont différentes vitesses de propagation peuvent être employés par un nœud pour estimer sa distance par rapport à un autre nœud. Par exemple, les nœuds cricket (Priyantha, 2005) utilisent un signal radiofréquence qui se propage à la vitesse c et un signal à ultrasons qui se propage à la vitesse v_u . La mesure des différences d'heure d'arrivée dh permet de calculer la distance D entre les nœuds :
$$D = (c - v_u) * dh.$$
Ce système donne des résultats très précis, mais tous les environnements ne sont pas adaptés aux ultrasons.

Techniques basées sur l'angle

- Principe de la localisation par mesure d'angles : la triangulation

La triangulation est une technique permettant de déterminer la position d'un point en mesurant les angles entre ce point et d'autres points de référence dont la position est connue et donc la distance entre eux. Ce point peut être considéré comme étant le troisième sommet d'un triangle (Figure 2-8) dont on connaît deux angles et la longueur d'un côté. Cette technique a été

utilisée par Thalès six cents ans avant l'ère chrétienne pour évaluer la distance d'un bateau en mer à la côte. Des calculs trigonométriques assez simples permettent de calculer les coordonnées du point. Dans un plan deux ancrs sont suffisantes pour se localiser.

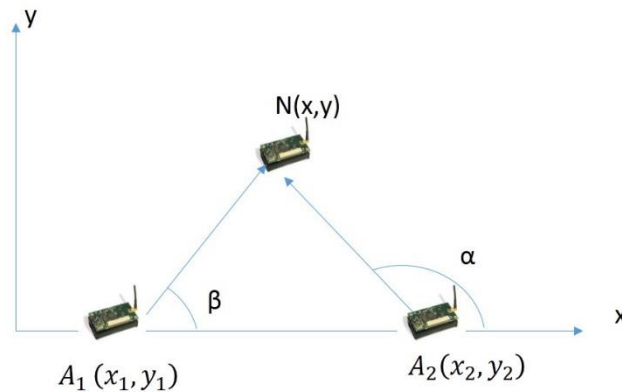


Figure 2-8 Localisation à base d'angles et triangulation

- Mesure de l'angle d'arrivée

L'angle d'arrivée (AoA, Angle of Arrival) est une technique reposant sur des antennes directionnelles ou des réseaux d'antennes permettant d'estimer l'AoA du signal de l'ancre par rapport à une référence.

Les inconvénients sont de deux types : d'une part la complexité des antennes et la taille de celles-ci afin d'offrir une diversité spatiale et mesurer avec précision l'angle d'arrivée ; d'autre part les erreurs dues à la non-visibilité NLOS du signal reçu peuvent être encore plus importantes que celles basées sur les techniques de RSSI ou TDoA.

2.6.5.4 Les techniques Range-free

Les techniques Range-free (Aspnes et al., 2006; Langendoen et al., 2003) requièrent l'existence d'ancres qui disposent chacune d'informations précises sur sa position, les autres nœuds dans le réseau estiment leur distance par rapport à trois ancres au minimum. Sur la base de ces informations, la localisation d'un nœud est estimée. Dans le cas de Range-free on n'a pas besoin d'un estimateur de la distance. Bien que l'existence d'un ancre puisse néanmoins être requise, l'emplacement des autres nœuds est estimé par les techniques de Range-Free.

Les techniques Range-free sont basées sur l'hypothèse qu'un nœud situé dans un environnement stable vis-à-vis des conditions de propagation des signaux est perçu de manière totalement dépendante de sa position par l'ensemble des nœuds fixes qui captent son signal. Ce signal peut-être mesuré et modélisé par une ou plusieurs des différentes techniques vues précédemment (RSSI, TOA, TDOA, AOA). La mesure du RSSI étant la plus simple, c'est elle qui est utilisée le plus fréquemment. Soient $N_1, N_2, \dots, N_i$ les i nœuds qui captent le signal du nœud à localiser, sa position (x, y) dans un plan (c'est vrai aussi dans l'espace).

- Identification par empreintes

Ils existent aussi des méthodes indépendantes de l'estimation des distances, qui sont indépendantes de la nature de l'environnement que ça soit en NLOS ou LOS. C'est notamment le cas de la technique qui associe à un emplacement une mesure par exemple de la puissance du signal RSSI. Lorsque le motif est observé plus tard, la situation peut être déduite. Nous nous focalisons sur le modèle basé sur la mesure de puissance du signal. Cette catégorie de techniques consiste à identifier l'empreinte du signal déjà stocké dans une base de données et de déduire l'emplacement

La technique comporte deux phases : la première dénommée phase hors ligne ou phase d'apprentissage est la construction d'une base de données contenant un grand nombre de couples <position, empreinte>. La deuxième phase dite temps réel ou la phase d'exploitation consiste à estimer la position du nœud en comparant le vecteur mesuré pour la localisation aux empreintes mémorisées dans la base. Cette phase utilise des techniques de reconnaissance de forme et de classification. Elle ne peut pas être réalisée sur le nœud lui-même, car celui-ci n'a pas une mémoire de taille suffisante pour stocker la base de données ; elle est donc réalisée sur un serveur de localisation avec lequel le nœud communique. Cette organisation se traduit par un fonctionnement un peu lent et donc limite la vitesse de déplacement du nœud à positionner s'il est mobile.

Les algorithmes de positionnement à base d'empreintes réalisent chacun une technique de reconnaissance des formes par une méthode ou un des moyens suivants: les méthodes probabilistes, la méthode des k plus proches voisins (KNN), les réseaux de neurones artificiels (ANN), les machines à vecteurs de support (SVM), et le plus petit polygone M-sommet (SMP).

Nous remarquons que les méthodes Range-free sont bien adaptées à notre scénario puisque la trajectoire du mobile est constante donc la position à estimer se trouve dans la base ou par interpolation sur la trajectoire entre deux positions enregistrées. Nous en avons testé une, cette expérimentation est décrite dans le chapitre 5. Une grande vitesse de déplacement du mobile peut cependant exclure ces méthodes.

2.6.5.5 Positionnement par capteurs proprioceptifs

Le positionnement par capteurs proprioceptifs est réalisé soit par une centrale inertielle soit dans le cas d'un mobile sur roues par odométrie (Abuhadrous, 2005).

Une centrale inertielle de six degrés de liberté fournit des informations sur la position et la vitesse en 3D. Elle se compose de trois accéléromètres, qui mesurent les mouvements de translation, et de trois gyroscopes montés dans un système de trois axes orthogonaux, qui mesurent les mouvements de rotation. Depuis ces informations la vitesse, l'attitude et par conséquent la position du mobile peuvent être obtenues par intégration. Assez précis et fiables, ces systèmes ont été réservés pendant longtemps au domaine militaire et au domaine de l'avionique en raison de leur coût élevé. Une telle centrale inertielle est le capteur d'un système de navigation inertiel ou INS (Initial Navigation System).

Le développement des gyroscopes en technologie MEMS a permis d'abaisser considérablement les coûts et d'intégrer un gyroscope dans la plupart des smartphones. Les accéléromètres sont intégrés à la construction de certains nœuds de réseau de capteurs. Cependant ces systèmes ont une précision limitée qui se traduit par une dérive sur le calcul de la position et donc la nécessité de recalage périodique. Un autre système de positionnement à fonctionnement intermittent est donc nécessaire. Dans les systèmes extérieurs, le couplage

GPS/ INS est fréquent pour obtenir un positionnement fiable s'affranchissant du passage à durée limitée du mobile dans des zones d'ombre du GPS.

Le filtrage de Kalman fournit un outil puissant pour créer le synergisme entre deux capteurs de navigation - GPS et INS - puisqu'il peut tirer profit des avantages et des caractéristiques des deux systèmes pour fournir un système intégré de navigation présentant une performance supérieure à celle de l'un ou de l'autre des sous-ensembles de capteur pris séparément (Grewal et al., 2007).

À noter que lorsque la trajectoire du mobile est une droite ou un cercle et que le mobile ne tourne pas sur lui-même la centrale peut être réduite à deux accéléromètres puisque d'une part le mouvement se situe dans un plan et d'autre part soit il n'y a pas de mouvement de rotation soit celui-ci est connu donc sa mesure est inutile.

Utilisation d'odomètres

Montés sur les roues du mobile, les odomètres mesurent le nombre de tours de roue effectués pendant une durée donnée. En pratique, cette information est utilisée sur une courte période pour en déduire une mesure de la vitesse de rotation des roues. Avec l'hypothèse d'absence de glissement entre les roues et le sol et connaissant les diamètres des roues, l'odométrie fournit le vecteur vitesse du déplacement et par intégration la position.

Dans la pratique, cette technique permet une estimation correcte de la vitesse, mais l'erreur est toutefois suffisamment grande pour que le calcul de la position cumule une erreur rapidement. Celle-ci peut atteindre jusqu'à 100 mètres après une minute de fonctionnement (Woodman et al., 2008) ce qui nécessite un recalage assez fréquent.

2.7 Conclusion

La surveillance étroite d'un grand équipement physique mobile sur une trajectoire unique connue est susceptible d'avoir des applications concrètes importantes tant pour la sécurité des utilisateurs que pour celle de l'équipement lui-même, pour sa maintenance et pour l'optimisation du service rendu. Une telle surveillance mettant en œuvre des capteurs embarqués capables de mesurer des variables du comportement propre du système et éventuellement de son environnement n'a pas été trouvée décrite dans la bibliographie consultée. D'une manière plus générale, la surveillance de système mobile à l'aide d'un réseau de capteur est un domaine peu investigué.

Nous avons défini un scénario assez précis, mais toutefois pas trop étroit de manière à définir de vraies problématiques de recherche et non un problème d'ingénierie spécifique. Ce scénario engendre des travaux de recherche dont le but a été limité à la conception et à l'optimisation d'un système de mesure destiné à la caractérisation ou à la surveillance d'un grand équipement physique (mécanique) mobile sur une trajectoire unique connue.

Pour mieux identifier les différents systèmes mécaniques sur lequel l'instrumentation serait déployée nous avons défini une nomenclature simple avec deux attributs : un code trajectoire – un code morphologie, cette nomenclature sera utilisé dans la suite du document.

L'objectif général de notre travail est donc de concevoir un système de capteurs capable d'acquérir la bonne information au bon endroit, en temps voulu et avec suffisamment de précision et de transmettre les données à la station de traitement en temps réel et sans perte.

Chaque mesure sera transmise avec sa localisation et avec un identificateur et l'ensemble constitue une charge d'environ 20 octets par paquet issu d'un nœud capteur.

Comme la technologie est globalement déterminée, car les nœuds doivent être choisis disponibles sur étagère, les variations de performances sont étroitement dépendantes des qualités de la topologie du réseau et du routage. Les performances attendues sont le plus petit délai (quelque centaine de ms), un débit suffisant ($>200\text{ko/s}$) et un taux de perte très faible ($< 5\%$). Une première problématique de recherche est donc de trouver une méthodologie de conception de topologie adaptée à la morphologie du système mécanique et à son mouvement. Cette topologie est presque toujours dynamique en raison de la mobilité du ou des capteurs embarqués. Elle doit assurer en permanence l'existence de chemins entre capteur(s) et puits. La deuxième problématique concerne l'algorithme de routage qui doit suivre parfaitement la dynamique de la topologie et assurer que les paquets transitent par le meilleur chemin, c'est-à-dire avec un nombre de sauts optimisé et sans goulot d'étranglement.

L'état de l'art réalisé montre que la localisation est encore un problème mal résolu dans les réseaux de capteur mobiles. La localisation étant une nécessité d'une part pour l'application et d'autre part pour le routage dans certains cas, elle constitue la troisième problématique des travaux de recherche en l'instanciant sur la nomenclature du type de système à instrumenter.

L'étude serait abstraite et les résultats seraient sans doute trop généraux et peu crédibles si elle ne s'appuyait pas sur des systèmes réels. C'est pourquoi deux systèmes réels ont été choisis pour mener les recherches présentées dans les chapitres suivants : la grande roue de Singapour, un bel exemple de système monolithique à trajectoire circulaire, et un convoyeur dans une usine de fabrication d'équipements électriques.

Chapitre 3 : Topologie de relais fixes pour un système mécanique mobile sur une trajectoire circulaire

3.1	Introduction.....	37
3.2	Typologie des systèmes	38
3.2.1	Système isolé	38
3.2.2	Système avec distribution de sous-ensembles le long de la trajectoire	38
3.2.3	Système avec rayons mécaniques	39
3.3	Topologie pour trajectoire de petit rayon.....	40
3.4	Topologie pour trajectoire de grand rayon.....	43
3.4.1	Introduction.....	43
3.4.2	Grille à pavement carré.....	43
3.4.3	Chemin de bordure.....	51
3.4.4	Placement de nœud relais.....	53
3.5	Routage pour topologie à relais fixes.....	56
3.5.1	Routage pour le premier saut.	56
3.5.2	Routage dans le réseau fixe.....	57
3.5.2.1	Adressage et routage dans la topologie à grille à pavement carré optimisée	57
3.5.2.2	Adressage et routage dans la topologie à chemin de bordure	58
3.6	Localisation.....	58
3.6.1	Utilisation d'un GPS	58
3.6.2	Identificateur de cellule.....	59
3.6.3	Localisation par empreintes du RSSI.....	59
3.6.4	Localisation à l'aide d'accéléromètres.....	60
3.7	Analyse de performances	62
3.7.1	Modèle de simulation et critères de performances.	62
3.7.2	Evaluation sur l'exemple	63

3.7.2.1	Topologie sur une grille à pavement carré optimisée et un seul capteur ..	63
3.7.2.2	Topologie sur une grille à pavement carré optimisée et 10 capteurs	66
3.7.2.3	Topologie avec relais fixes sur bordure et un capteur	68
3.7.2.4	Evaluation sur la grande roue Syngapore Flyer	70
3.8	Conclusion	74

3.1 Introduction

Pour donner un aspect concret à notre étude qui ne peut pas couvrir de manière détaillée tout type de trajectoire, nous avons choisi d'approfondir celle-ci dans le cas d'une trajectoire circulaire. L'objectif est donc de proposer une architecture de réseau de capteurs permettant d'acquérir en temps réel, depuis un poste fixe, des informations saisies par un ou des capteurs sur un système physique (mécanique) mobile sur une trajectoire circulaire connue parcourue cycliquement, périodiquement ou non. Par architecture nous entendons la définition matérielle des nœuds, la topologie du réseau, les protocoles utilisés en particulier pour le routage des paquets et la technique de localisation. Toutefois nous n'avons pas choisi une technique particulière pour ce cas d'étude.

La communication entre le ou les capteurs et le puits est réalisée par une liaison radio d'une portée R_c très limitée. Pour rendre le réseau connecté et assurer une topologie optimale, il peut être nécessaire de placer judicieusement un certain nombre de nœuds relais entre le capteur et le puits. Les relais sont des nœuds qui peuvent assurer la fonction de routage des paquets et si nécessaire la fonction de capteur, donc la mesure de grandeurs physiques. Les nœuds relais peuvent aussi participer à la localisation du ou des nœuds capteurs mobiles en particulier en jouant le rôle d'ancres.

En fonction de la typologie du système physique et de sa taille, deux grands types de topologie sont envisageables :

- Dans le premier type, la liaison fixe-mobile est située à chaque interface d'un nœud capteur (il peut y en avoir plusieurs). Celui-ci envoie les données mesurées directement au puits s'il est plus localisé à une distance de celui-ci plus petite que le rayon de propagation. Sinon, il envoie les paquets à un relais situé au sol. La topologie doit fournir une connectivité permanente du capteur au puits ce qui signifie : (a) assurer une connexion mobile-fixe permanente donc que le puits ou un relais soit situé en permanence à une distance du capteur inférieure au rayon de propagation et (b) assurer une connexion permanente dans le réseau de relais situés au sol.
- Dans le deuxième type, la liaison mobile-fixe est située au niveau du puits (cf figure 2-2). Lorsque le système est grand, un nœud capteur peut être en dehors du rayon de propagation du puits et il est donc nécessaire de positionner des relais sur le mobile. Les relais forment un réseau embarqué avec des contraintes symétriques au premier type à savoir (a) assurer une connexion mobile-fixe permanente donc que le capteur ou un relais soit situé en permanence à une distance du puits inférieure au rayon de propagation et (b) assurer une connexion permanente dans le réseau de relais embarqués.

Il serait possible de développer une topologie hybride des deux précédentes, donc avec des relais à la fois au sol et embarqués et une liaison fixe-mobile entre relais. Si le relais au sol est toujours le même, ce cas est semblable au deuxième type, la partie au sol étant un simple lien invariant d'acheminement vers le puits. Sinon, le système est complexe et nous n'avons pas décelé l'intérêt de cette complexification. Nous étudierons le premier type dans ce chapitre et le deuxième dans le chapitre suivant.

L'étude est naturellement menée dans le cadre de quelques hypothèses réalistes qui permettent d'en limiter le périmètre.

- **Hypothèse 1** : Tous les capteurs ont le même rayon de communication et même sensibilité en réception donc les liaisons radio sont symétriques (il est impossible de trouver pratiquement des nœuds qui ont cette caractéristique donc c'est une hypothèse de travail).
- **Hypothèse 2** : Le modèle de couche physique est idéal, c'est le modèle de disque binaire ; un nœud destinataire C_i reçoit toujours sans erreur un message d'un nœud émetteur C_j quand il se trouve à sa portée, c'est-à-dire si la distance $d(C_i, C_j) \leq R_c$, avec R_c : rayon de communication, valeur comprise entre 1 et 50 mètres avec les technologies considérées.
- **Hypothèse 3** : les calculs et les démonstrations sont faits dans un espace 2D.

3.2 Typologie des systèmes

Les grands systèmes mécaniques mobiles sur une trajectoire circulaire parcourue cycliquement sont présents dans l'industrie et dans les parcs de loisirs. Leur morphologie permet ou non d'implanter des relais à bord et de placer ou non un puits fixe au centre du cercle ou à proximité de celui-ci. Nous utilisons la typologie et la nomenclature définies dans le chapitre 2 pour caractériser ces systèmes.

3.2.1 Système isolé

Nous affectons la nomenclature TC-SI à ce type de système. Ce type est caractérisé par un ou plusieurs systèmes mécaniques indépendants de taille modeste en regard du cercle sur lequel ils se déplacent. Ce n'est donc pas véritablement un grand système mécanique si on considère chaque système isolément de son mouvement. Cela peut être un ou plusieurs engins automoteurs se déplaçant sur une piste, guidé par un ou des rails ou par un système sans contact ou roulant sur une piste étroite (pour que la trajectoire soit considérée comme circulaire). Un seul nœud capteur mobile est installé sur chaque mobile. Nous n'avons pas d'exemple précis de système réel de ce type.

3.2.2 Système avec distribution de sous-ensembles le long de la trajectoire

Nous affectons la nomenclature TC-SD à ce type de système. Ce type est caractérisé par des petits modules liés mécaniquement se déplaçant sur la trajectoire circulaire. Un manège est un exemple de ce type. Pour être précis, il faudrait étudier deux cas : celui où il est possible d'implanter un puits fixe au centre du cercle ou à proximité de celui-ci et celui où ce n'est pas possible. Un nœud capteur est installé sur chaque module. Chaque nœud peut être utilisé comme simple capteur ou être utilisé comme simple relais ou remplir les deux fonctions. Nous avons étudié le plus grand système de ce type à notre connaissance qui est la grande roue de Singapour, « *the Singapore Flyer* » illustré par la Figure 3-1. À noter que ce système pourrait aussi être classé dans le type suivant, mais il est plus approprié de le classer ici, car la distance entre deux modules est inférieure au rayon du cercle.



Figure 3-1 Singapore Flyer

3.2.3 Système avec rayons mécaniques

Nous affectons la nomenclature TC-SM à ce type de système puisqu'il est monolithique. Un bras mécanique relie chacun des modules qui parcourent la trajectoire circulaire au centre du cercle ou les bras constituent les modules eux-mêmes. Les bras sont liés mécaniquement et l'ensemble constitue donc un système monolithique. La distance entre les modules ou l'extrémité des bras est normalement supérieure au rayon du cercle. Un nœud capteur est installé sur chaque module et des nœuds peuvent être installés sur chaque bras. Le puits peut être implanté à proximité du centre du cercle. Un exemple typique est celui des grandes éoliennes. Par exemple, la société Alstom fabrique l'éolienne Haliade 150, dont la puissance atteint 6 MW, conçue pour être installée en mer. Le rotor est situé à une hauteur de 100 mètres et les pales mesurent 73,5 mètres, les extrémités décrivant un cercle de diamètre 150 mètres.



Figure 3-2 Eolienne Haliade 150

3.3 Topologie pour trajectoire de petit rayon

La taille du rayon r de la trajectoire du ou des capteurs NRCm s'apprécie par rapport à la valeur du rayon de communication R_c . Nos capteurs retenus sont des MicaZ qui utilisent le composant de communication ChipCon CC2420 sur lequel la puissance d'émission du nœud peut être réglée. R_c a une valeur comprise entre 1 et 50 mètres dans nos hypothèses.

Un seul saut

Le placement idéal du puits se situe au centre du cercle. Si ce placement peut être réalisé, et si $r < R_c$, alors le ou les capteurs peuvent toujours communiquer directement avec le puits en un saut, il n'est pas utile d'avoir des relais.

Si le puits ne peut pas être installé au centre du cercle, mais à une distance a de celui-ci, la condition de communication directe devient : $r + a < R_c$ avec $a < r$ (figure 3.3 a) ou $a > r$ (figure 3.3 b).

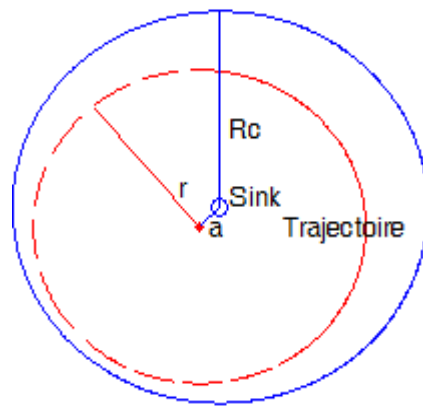


figure 3.3 a : cas $a < r$

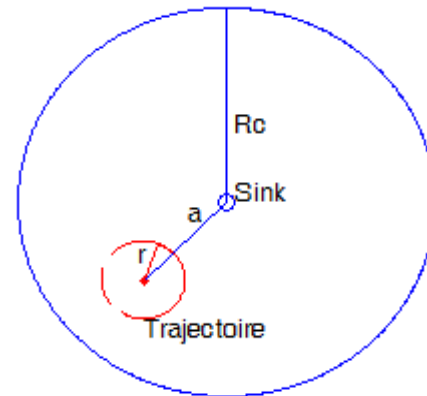


figure 3.3 b : cas $a > r$

Figure 3-3 Petit rayon, puits décalé du centre d'une distance a

Deux sauts

Soit une trajectoire circulaire de rayon r tel que :

$$\sqrt{2} \cdot R_c > r > R_c \quad (3-1)$$

Une hypothèse supplémentaire est posée : il est possible d'installer des relais à l'intérieur du cercle.

La Figure 3-4 représente la situation extrême, celle où le mobile est le plus éloigné des relais. Cette position est caractérisée par une distance égale entre le mobile et les deux relais les plus proches.

Soient le vecteur $\vec{V}$ positionnant un des deux relais les plus proches par rapport au centre de la trajectoire, $\vec{W}$ le vecteur positionnant le mobile par rapport à ce même centre en position extrême et $\vec{U}$ le vecteur exprimant la position du mobile par rapport à ce relais. Soit β l'angle qui sépare les deux vecteurs, $(\vec{V}, \vec{W}) = \beta$.

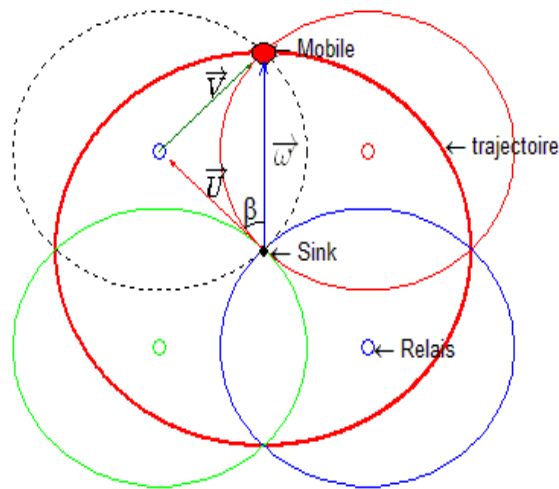


Figure 3-4 . Trajectoire circulaire

On a :

$$\vec{U} = \vec{W} + \vec{V} \quad (3-2)$$

Donc :

$$\|\vec{U}\|^2 = \|\vec{V}\|^2 + \|\vec{W}\|^2 - 2\|\vec{V}\| * \|\vec{W}\| * \cos \beta \quad (3-3)$$

Avec :

$$\|\vec{V}\| = \|\vec{U}\| = Rc \text{ et } \|\vec{W}\| = r \quad (3-4)$$

L'expression (3-3) devient :

$$Rc^2 = r^2 + Rc^2 - 2 * r * Rc * \cos\beta \quad (3-5)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{r}{2*Rc}\right) \quad (3-6)$$

La valeur maximale $r_{\max}$ de r est obtenue pour $\beta = \frac{\pi}{4}$, soit $r_{\max} = \sqrt{2} * Rc$.

Le nombre optimal de nœuds fixes est donc 4 pour $\sqrt{2} * Rc > r > Rc$.

Pour visualiser la couverture radio, nous avons développé une simulation sous Matlab qui prend en considération les caractéristiques de l'interface radio du type de nœud capteur retenu : le MicaZ de Crossbow (Datasheet, 2006) avec une valeur de $Rc = 50$ mètres.

La simulation de la couverture radio est visualisée par le niveau de RSSI sur la Figure 3-5.

Notre simulateur ne prend en charge que l'espace libre en 2D « 400m x 400m » sans obstacle.

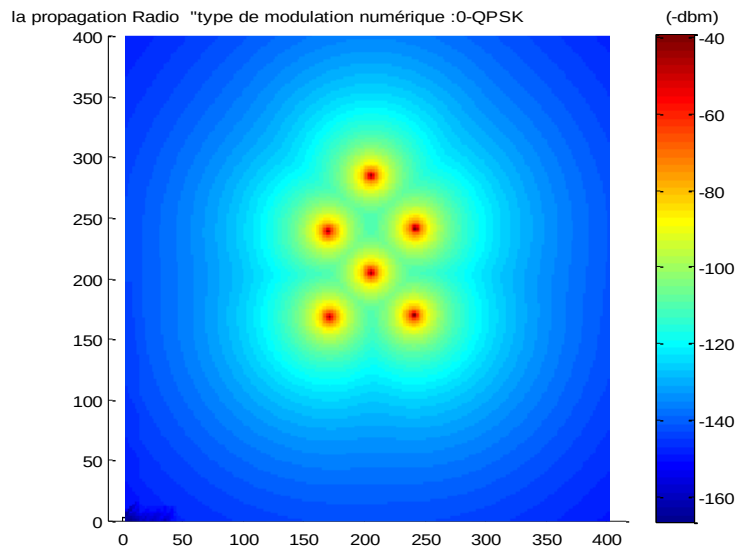


Figure 3-5 Cartographie de la couverture radio

Pour des trajectoires à rayon plus grand, deux approches génériques seront développées au paragraphe suivant.

3.4 Topologie pour trajectoire de grand rayon

3.4.1 Introduction

Lorsque le rayon r de la trajectoire du ou des capteurs mobiles NRC_m est supérieur à $\sqrt{2}R_c$, il faut créer un réseau de nœuds relais satisfaisant les deux conditions décrites dans l'introduction de ce chapitre à savoir :

- (a) assurer une connexion mobile fixe permanente, ce qui signifie qu'un relais NR_i dit *relais interface* soit situé en permanence à une distance du capteur mobile inférieure au rayon de propagation, ce qui s'écrit formellement, avec t le temps :

$$\forall t, \exists NR_i \text{ tel que Distance } (NR_i, NRC_m) < R_c$$

- (b) assurer une connexion permanente dans le réseau de relais situés au sol pour assurer le routage des paquets depuis le *relais interface* de la liaison mobile-fixe jusqu'au puits (intégré dans cette définition à l'ensemble des nœuds relais NR_i), ce qui s'écrit formellement :

$$\forall NR_i, \exists NR_j \text{ tel que Distance } (NR_i, NR_j) < R_c$$

Une topologie régulière satisfaisant à ces conditions peut être construite de différentes façons. Les topologies régulières de réseau de capteurs sont habituellement définies à partir de deux conditions : un rayon de capture des informations et un rayon de communication. Dans notre cas, seul le rayon de communication doit être pris en compte. Nous allons examiner trois constructions.

3.4.2 Grille à pavement carré

Nous restons dans l'hypothèse de relais implantables à l'intérieur du cercle de la trajectoire.

Une première construction consiste à placer les nœuds aux points d'intersection des lignes et des colonnes d'une grille, ces lignes et colonnes étant espacées d'une distance égale d , choisie légèrement inférieure à R_c . Cette grille forme donc un pavement de carrés.

Pour simplifier le problème de bordure, la grille est centrée sur le centre du cercle, c'est à dire que celui-ci est placé sur un point d'intersection. Une hypothèse supplémentaire, peu contraignante, est de pouvoir placer le puits sur un point d'intersection, si possible au centre, mais ce n'est pas nécessaire. Ce placement des nœuds est illustré par la Figure 3-6

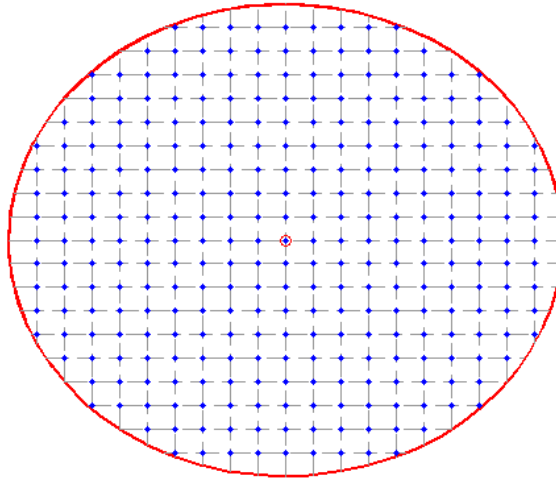


Figure 3-6 Grille à pavement carré centrée sur le centre du cercle

Limite de la grille

Théorème : La limite de la grille de placement des relais est constituée de ses points à l'intérieur du cercle situés les plus proches de ce cercle.

Démonstration :

Considérons un carré situé dans le premier quadrant du cercle. Pour les autres quadrants, il suffit de changer les appellations des sommets du carré pour retrouver les mêmes situations.

Dans ce carré de côté d et de sommets A, B, C et D, un arc de cercle de rayon $R > d$ peut couper les côtés de trois façons :

- F1 : sur les côtés AB et AD. A est le seul point intérieur et tout point du cercle intérieur au pavé est à une distance de A inférieure à d (Figure 3-7).

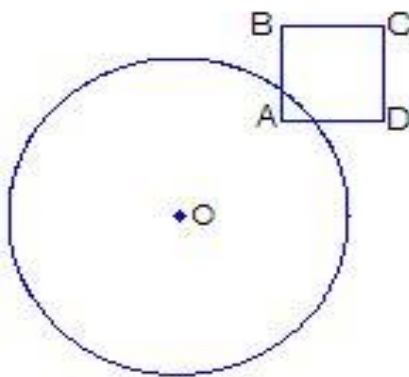


Figure 3-7 Un seul sommet intérieur

- F2 : sur les côtés AB et CD (respectivement AD et BC). Les deux sommets voisins A et D (respectivement A et B) sont situés à l'intérieur et tout point du cercle intérieur au pavé est à une distance de A ou de D (respectivement A ou B) inférieure à d (Figure 3-8). On intègre aussi les cas limites du passage par les points B ou D.

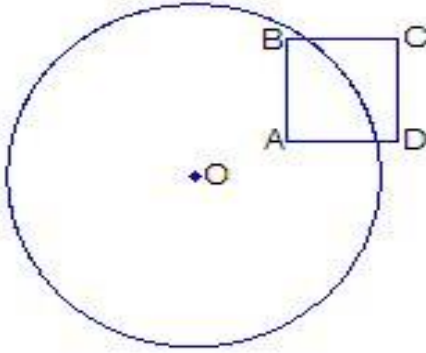


Figure 3-8 Deux sommets voisins intérieurs

- F3 : sur les côtés BC et DC. Les deux sommets opposés B et D sont intérieurs et tout point du cercle intérieur au pavé est situé à une distance de B ou de D inférieure à d (Figure 3-9). On intègre le cas limite du passage par le point C.

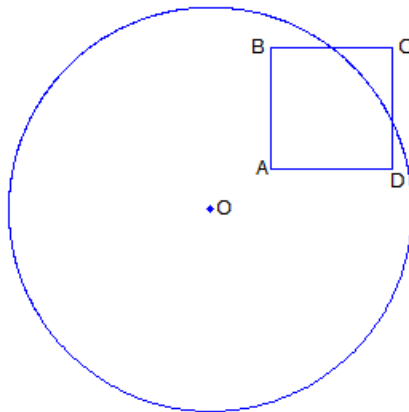


Figure 3-9 . Deux sommets opposés intérieurs

Nous avons démontré par l'examen des trois cas possibles que la limite de la grille de placement des relais est constituée de ses points à l'intérieur du cercle situés les plus proche de ce cercle.

Indexation des nœuds relais

Pour une connaissance parfaite de la topologie et pour l'adressage qui est utile à certains protocoles de routages il est nécessaire d'indexer les nœuds, ce qui revient à définir une adresse. Soient i l'index des colonnes de la grille et j l'index des lignes, i et j entiers relatifs.

Soit un système de coordonnées cartésiennes à deux dimensions spatiales X et Y dans lequel le centre occupe les coordonnées du point d'origine (x_0, y_0) . L'axe X est donc la ligne d'index $j=0$ et l'axe Y la colonne d'index $i=0$. Dans un tel système de coordonnées, les coordonnées (x_i, y_j) d'un nœud relais sont calculés à l'aide de leurs index i et j par :

$$\begin{cases} x_i = x_0 + i * d & \text{avec } -L \leq i \leq L \\ y_j = y_0 + j * d & \text{avec } -L \leq j \leq L \end{cases}$$

$$\text{et : } L = \max(i) \text{ tel que } L * d < r, \sqrt{x_i^2 + y_j^2} < r$$

Pour faciliter l'écriture, on notera $N_{i,j}$ le nœud de coordonnées x_i, y_j .

Les *relais interfaces* $NRI_{i,j}$ sont ceux qui sont situés au plus près du cercle. Un NRI borde la grille pour chaque ligne et chaque colonne dans chaque quadrant. Comme il peut y avoir plusieurs NRI pour une ligne (donc une valeur de j) ou pour une colonne (donc une valeur de i), il est intéressant d'utiliser la propriété suivante pour déterminer les NRI :

Propriété (exprimée dans le premier quadrant) : un seul $NRI_{i,j}$ par ligne borde la grille pour $i > j$; exprimé autrement, pour $i > j$, $NRI_{i,j}$ est unique pour chaque valeur de j .

De même, un seul $NRI_{i,j}$ par colonne borde la grille pour $i < j$; exprimé autrement, pour $i < j$, $NRI_{i,j}$ est unique pour chaque valeur de i .

Le cas $i=j=m$ est particulier.

Notons que $m = \text{partie entière} \left(\frac{r}{d\sqrt{2}} \right)$.

$NRIm,m$ existe si m est la plus grande valeur telle que $\sqrt{x_m^2 + y_m^2} < r$ et

$\{NRIm, m+1 \text{ et } NRIm+1, m\}$ n'existent pas, comme le montre la figure 3.10. Sinon $NRIm,m$ n'existe pas. Cette condition d'existence peut aussi s'écrire : $\sqrt{x_m^2 + y_m^2} + \frac{d}{\sqrt{2}} < r$

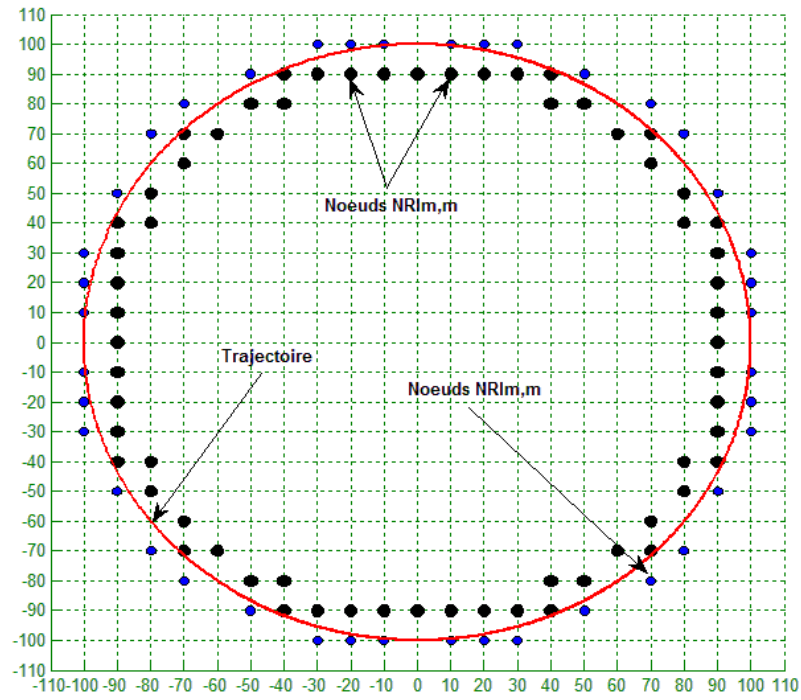


Figure 3-10 . Existence de $NR_{Im,m}$

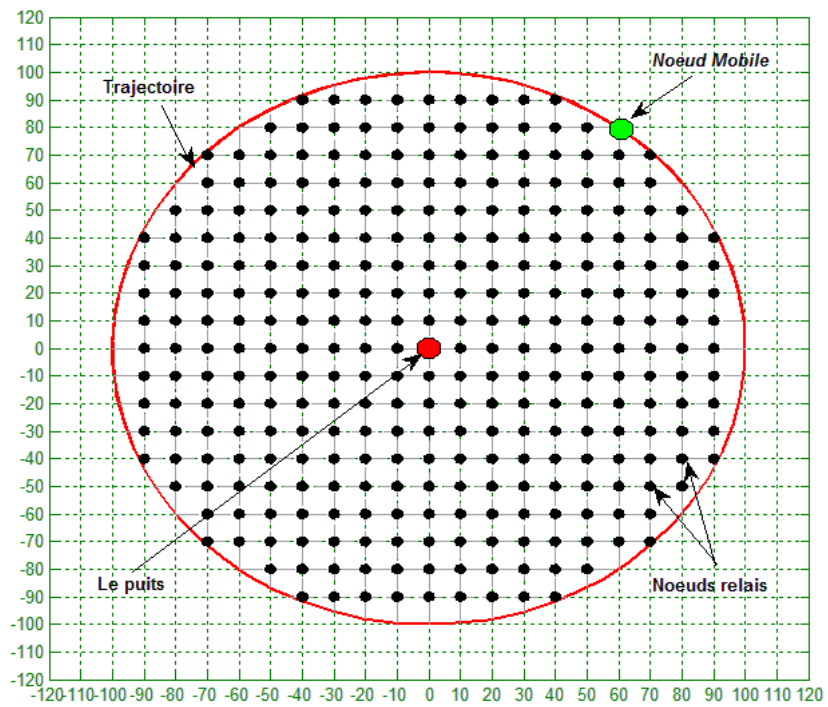


Figure 3-11 . La topologie pour $r = 100\text{ m}$ et $R_c = 10\text{ m}$

Exemple : La configuration avec un rayon de la trajectoire $R = 100\text{m}$ et le rayon de communication $RC = 10\text{m}$ donne la topologie représentée sur la Figure 3-11 avec 304 nœuds relais (le puits n'est bien sûr pas compté) dont 56 relais interfaces NRI.

Optimisation du nombre de relais

La topologie en grille carrée permet de nombreux chemins de routage depuis les *nœuds interface* situés près du cercle jusqu'au puits. Cette redondance de chemins multisaute est coûteuse en termes de nœuds déployés et n'augmente pas la durée de vie du réseau liée à l'énergie dans les nœuds dans le cas général d'un équipement homogène des nœuds en batterie, hors le puits. En effet, les 4 nœuds voisins du puits sont les premiers épuisés, car ils doivent relayer tous les messages quel que soit le chemin utilisé. Cette redondance a toutefois la qualité de conserver une route dans la plupart des cas de mort d'un nœud relais. Mais pour que cette redondance soit efficace, il faudrait l'étudier spécifiquement en définissant formellement les attributs de survivabilité du réseau, la structure et les probabilités de défaillance des composants de la structure ou des attaques du système (Sterbenz et al., 2010). Cette étude dépasse le cadre de cette thèse, c'est pourquoi une topologie permettant simplement une connectivité totale est recherchée.

Stratégie de réduction du nombre de relais

Nous considérons le cas le plus simple où le puits est situé au centre du cercle. S'il est décalé, il faut légèrement adapter l'algorithme proposé.

La stratégie s'appuie d'abord sur deux contraintes :

- Ne pas supprimer de nœud qui supprimerait la seule route à coût minimal (minimum de sauts),
- Maintenir les quatre voisins du puits pour équilibrer au mieux le trafic autour du puits et éviter l'épuisement précoce du ou des voisins du puits.

Principe de la réduction

Le principe est expliqué en se plaçant dans le premier quadrant; pour les autres quadrants, un ou deux indices sont négatifs et il suffit d'adapter les relations à ces index. Pour rappel, chaque relais assurant la liaison mobile fixe est appelé *relais interface*, noté ici $NRI_{i,j}$ et ne doit jamais être supprimé.

Constat : toutes les routes existantes depuis un nœud interface vers le puits obtenues par routage géographique ont des coûts identiques et constituent un minimum, voir Figure 3-11.

Ce constat et la deuxième contrainte induisent de définir 4 routes principales partant du puits (nœud $N_0, 0$) : ces routes sont sur les axes X et Y.

Pour tout nœud NRI, le routage optimal est de rejoindre la route principale la plus proche. Il en résulte que certains nœuds sont inutiles. Pour les supprimer, une méthode en deux étapes a été conçue.

Etape 1.

Formellement, l'écriture est la suivante :

- Soit le nœud $NRI_{i,j}$ avec i et $j > 0$ (1^{er} quadrant)
- Si $i > j$, $NRI_{i,j}$ doit envoyer ses paquets vers le chemin principal OX, donc vers $N_{i,j-1}$
- Si $i < j$, $NRI_{i,j}$ doit envoyer ses paquets vers le chemin principal OY, donc vers $N_{i-1,j}$
- Si $i = j = m$, $NRIm,m$ s'il existe (voir précédemment) est placé sur la bissectrice du quadrant, les deux solutions sont équivalentes et redondantes.

Pour un nœud NRI, $i > j$ est équivalent à $i > m$. Il est résulté que l'on peut supprimer tous les nœuds $N_{i,j}$ pour $i = 1, m-1$ et $j = 1, m-1$ puisqu'il ne sont jamais sur une route.

Cette première étape est illustrée sur la Figure 3-12 par les nœuds représentés par une croix + qui sont supprimés. Dans ce cas, 36 relais ont été supprimés pour ce quadrant.

Etape 2.

Le raisonnement décrit ci-après ne concerne que le demi quadrant inférieur, c'est-à-dire pour $j < \frac{L}{2}$. Un raisonnement symétrique s'applique pour le demi-quadrant supérieur en remplaçant i par j et en considérant l'axe Y comme route principale.

Il faut conserver la route sur la colonne $i = m$ pour les paquets du relais $NRIm,m$ s'il existe (cas n°1) afin qu'ils rejoignent l'axe X. Donc conserver les nœuds $N_{m,j}$ avec $j = 1, m-1$.

Si $NRIm,m$ n'existe pas (cas n° 2), $NRI_{m+1,m}$ existe et il faut conserver la route de la colonne $i = m+1$. Donc les nœuds $N_{m+1,j}$ avec $j = 1, m-1$.

Les nœuds $NRI_{i,j}$ avec $i > m$ peuvent envoyer leurs paquets vers l'axe X ou vers la colonne m (cas n°1) ou $m+1$ (cas n°2) au même coût global. Il est donc possible de supprimer des nœuds.

Principe retenu : les nœuds NRI envoient vers l'axe X tant que le route existe obligatoirement (formée par des NRI) ou que la distance à l'axe X est inférieure à la distance à la colonne m (cas n°1) ou $m+1$ (cas n°2). Les nœuds inférieurs (j plus petit) ne peuvent pas être supprimés. Sinon, les nœuds NRI envoient vers la colonne m ou $m+1$ et les nœuds inférieurs peuvent alors être supprimés.

L'algorithme est donc, pour le cas n°1 (partir de $m+2$ pour le cas n°2) :

Pour $i = m+1, L$, examiner tous les $NRI(i, j)$

Trouver NRI (i,j) tel que $j > (i-m)$, soit j_n la valeur de j correspondante.

Supprimer tous les nœuds $N(i, j = 1, j_n-1)$

finPour

Exemple : sur le cas illustré par la figure 3.12, $m=7$ et le nœud NRI (8,5) est tel que $5 > (8-7)$. Donc les nœuds $N(8,j=1,4)$ sont supprimés soient $N(8,1)$, $N(8,2)$, $N(8,3)$ et $N(8,4)$. Ces nœuds sont marqués d'une croix x sur la figure. Huit nouveaux nœuds sont supprimés dans ce quadrant soient 32 en tout.

La topologie finale comporte donc $304 - 4*36 - 4*8 = 128$ nœuds. La stratégie de réduction a donc fait économiser 68% de nœuds.

Remarque : il aurait été possible de supprimer d'autres relais sans restreindre la connectivité (pas dans le cas pris en exemple), mais en coupant des routes à coût minimal donc en ne respectant pas une des contraintes imposées.

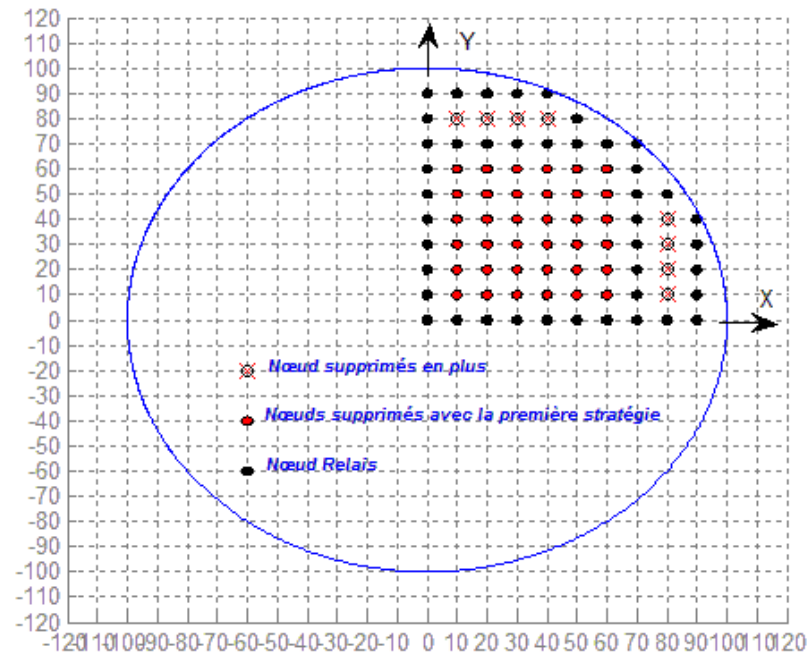


Figure 3-12 Optimisation de la topologie dans le premier quadrant

À noter que cette topologie, sur l'exemple, place les relais interfaces à une distance de 9 à 14 sauts du puits donc les paquets issus du nœud capteur mobile feront entre 10 et 15 sauts pour atteindre le puits.

La perte d'un nœud a une conséquence qui dépend de sa place dans la topologie. La perte d'un nœud interface fait perdre la liaison mobile fixe sur la portion de trajectoire couverte par ce nœud tandis que la perte d'un des voisins du puits fait perdre un quart de la trajectoire.

3.4.3 Chemin de bordure

Une solution intuitive est de placer les relais fixes le long de la trajectoire. Ils seront placés sur un cercle confondu avec celle-ci ou sur un cercle proche intérieur ou extérieur suivant les possibilités d'implantation (Figure 3-13). Le cercle de positionnement des relais a nécessairement un rayon compris entre $r-RC$ et $r+RC$.

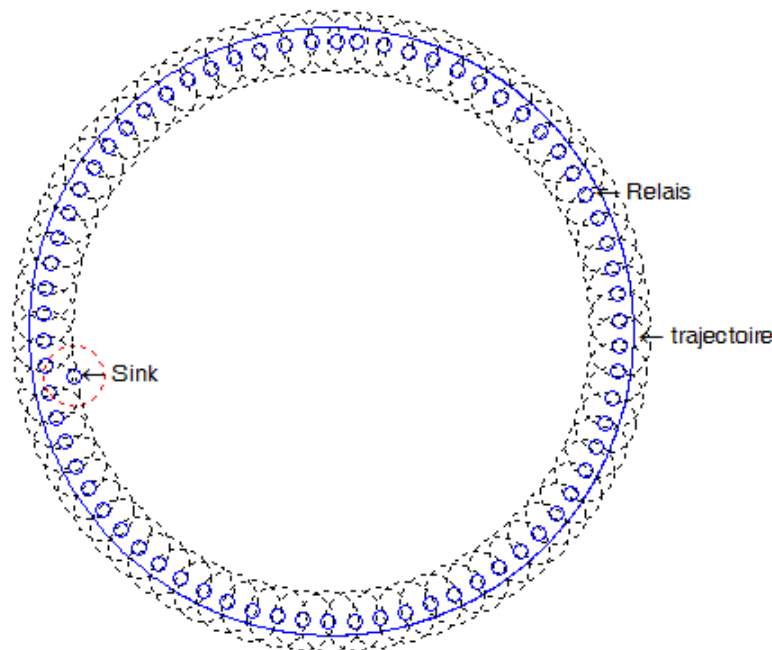


Figure 3-13 Topologie type chemin de bordure

La topologie du réseau de relais fixes est alors circulaire (ce serait la même définition si la géométrie n'était pas un cercle) appelée aussi en boucle ou en anneau. Chaque nœud est connecté à deux autres, un de chaque côté. Le puits est intégré dans la boucle. L'hypothèse faible qui est retenue est qu'il est placé sur le même cercle que les relais et qu'il peut assurer comme eux la liaison mobile fixe. Ce n'est toutefois pas une obligation

Cette solution a un intérêt évident lorsque le puits ne peut pas être placé à l'intérieur du disque défini par la trajectoire du mobile. Dans ce cas, la possibilité de placer les relais à l'intérieur du disque est aussi peu probable.

Nombre de nœuds

Avec l'hypothèse du placement sur la trajectoire, le calcul du nombre N de nœuds sur le cercle, relais plus puits, est déduit à partir du rayon r du cercle et du rayon de propagation Rc par le calcul suivant (Figure 3-14), avec Nx le nombre théorique idéal de nœuds :

$$2\alpha = \frac{2\pi}{N_x}$$

$$\text{Donc } \alpha = \frac{\pi}{N_x}$$

$$\sin(\alpha) = \frac{R_c}{2r} \text{ donc } \sin\left(\frac{\pi}{N_x}\right) = \frac{R_c}{2r}$$

$$\text{Donc } N_x = \frac{\pi}{\text{Arcsin}\left(\frac{R_c}{2r}\right)}$$

N est l'entier immédiatement supérieur à Nx.

Exemple : En reprenant les valeurs de l'exemple pris pour la topologie à grille carré, donc un cercle de rayon 100 mètres et un rayon de propagation de 10 mètres, on trouve :

$$N_x = 62,77$$

Donc N = 63 nœuds sur la boucle soient 62 relais.

Ces nœuds sont tous des *relais interfaces* NRI.

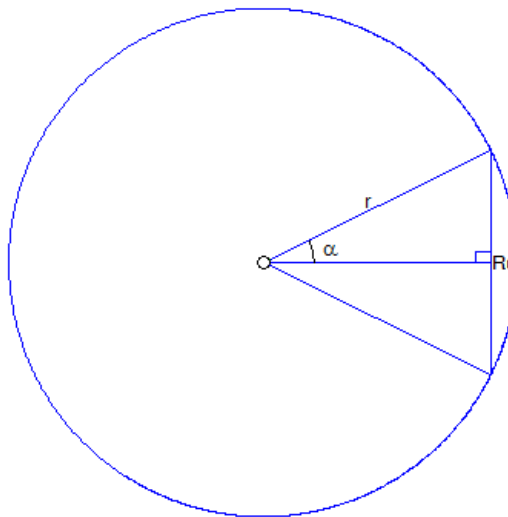


Figure 3-14 Calcul du nombre de relais

Le routage des paquets peut être réalisé dans un sens de la boucle ou dans l'autre. En prenant le sens le plus favorable le nombre de sauts dans la topologie au sol, pour l'exemple, est donc compris entre 0 et 31. Les paquets issus du capteur feront donc entre 1 et 32 sauts pour atteindre le puits. À noter que cette topologie peut fonctionner en mode dégradée après la perte d'un nœud, le routage étant toujours assuré en utilisant le sens restant fonctionnel, mais la liaison mobile fixe n'étant plus assurée sur la portion de trajectoire couverte par le nœud relais interface défaillant.

3.4.4 Placement de nœud relais par arbre de Steiner

L'objectif principal du placement est de déployer un nombre minimal de nœuds relais pour assurer la connectivité entre un nœud de bordure quelconque et le puits (Figure 3-15). Étant donné un ensemble de nœuds dans le plan euclidien, notre objectif est de placer un nombre minimal de nœuds relais de sorte que le réseau soit connecté. Il existe deux variantes (Gupta et al., 2003), la première consiste à déployer le même type de nœuds (relais et mobile), avec le même rayon de communication. Dans la deuxième variante, les nœuds relais ont des caractéristiques différentes des nœuds mobiles, leur rayon de communication est plus grand que celui du nœud mobile.

Dans le cas de la première variante, les auteurs (Cheng et al., 2009) considèrent un réseau de capteurs homogènes où tous les nœuds ont la même la puissance de transmission. Dans leurs travaux, les auteurs tentent d'optimiser le nombre de nœuds relais dans la zone d'interconnexion tout en assurant une couverture optimale. Les auteurs (Lin et al., 1999) ont formulé le problème en tant qu'Arbre de Steiner minimum avec nombre minimal de nœuds de Steiner et délimité le problème avec la longueur de l'arête (rayon de communication des nœuds). Ils ont prouvé que le problème est NP-complet et ils ont proposé un algorithme basé sur arbre de Steiner couvrant minimum à 5 sauts. Suite à ce travail, plusieurs auteurs ont abordé le problème de la connectivité et le placement des nœuds relais en proposant différents algorithmes d'approximation.

En faisant une généralisation de ce modèle, les auteurs (Lloyd et al., 2005) proposent un modèle d'optimisation où les nœuds relais ont une couverture radio plus grande que les autres nœuds, ce qui minimise le nombre de capteurs y compris les nœuds relais. Ainsi le modèle est optimisé en utilisant une approximation basée sur l'algorithme du Spanning Tree minimum (MST).

La topologie théoriquement optimisée entre les nœuds interfaces et le puits est obtenue par l'arbre de Steiner en exploitant la distribution polaire uniforme des sommets et en limitant ainsi les sommets du graphe aux nœuds interface. Cette étude est donc limitée au cas où le puits est placé au centre du cercle. L'arbre de Steiner doit nous donner tous les plus courts chemins depuis les nœuds relais interfaces au puits.

Premièrement, nous devons commencer à placer les nœuds relais interfaces ou de bordure, comme le montre la Figure 3-15, car ce sont ceux qui assurent la liaison mobile fixe.

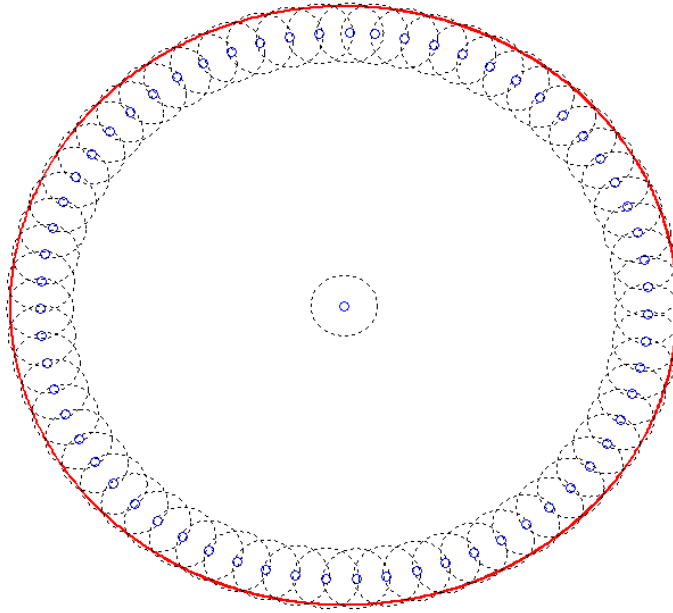


Figure 3-15 : Couverture de la trajectoire avec les nœuds de bordure

- L'algorithme

Le problème est formulé comme suit: étant donné les coordonnées d'un ensemble de nœuds de bordures X , trouver un ensemble minimal de nœuds relais Y tel que la distance soit identique pour chaque nœud, avec la distance inférieure au rayon de propagation.

Le graphe non orienté induit est formulé : $G = (X \cup Y, W)$ avec :

- X : L'ensemble des sommets du graphe.
- Y : Ensemble des points de Steiner
- W : L'ensemble des arêtes reliant les sommets avec le puits.

D'une manière formelle, l'algorithme est défini comme suit:

Algorithme 1: Algorithme de Placement de nœuds relais

Entrée : Soit X l'ensemble de nœuds $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ de bordure dans un espace euclidien réel positif $R_c \geq 0$ représente le rayon de communication des nœuds. x_0 représente le puits.

Sortie : Ensemble Y des nœuds relais « point de Steiner » $Y = \{Y_1, \dots, Y_k\}$ avec $|Y|$ est minimum

Etape 1 :

Calculer l'arbre couvrant de poids minimal T_{mst} à partir du graphe du graphe G

Etape 3 :

$K=0$

Faire

Pour chaque arrêt (x_i, x_j) de T_{mst}

Si $(R_c < \|x_i x_j\| \leq 2R_c)$

$K = k + 1$

Placer un nœud Y_k relais à la même distance R_c de X_i et X_j

Sinon

Placer 2 nœuds relais avec :

Y_{k+1} avec la distance R_c et X_i

Y_{k+2} avec la distance entre R_c et X_j

Placez $\frac{\|X_i X_j\| - 2R_c}{R_c}$ nœuds relais $Y_{k+3}, Y_{k+4}, \dots, Y_{k+\left\lceil \frac{\|X_i X_j\| - 2R_c}{R_c} \right\rceil + 1}$ sur le segment $[Y_{k+1}, Y_{k+2}]$, ces nœuds relais séparent le segment $[Y_{k+1}, Y_{k+2}]$ en $\left\lceil \frac{\|X_i X_j\| - 2R_c}{R_c} \right\rceil$ parties égales.

$$K = k + 2 \left\lceil \frac{\|X_i X_j\| - 2R_c}{R_c} \right\rceil - 1$$

Fin si

Fin pour

Tant que (l'arbre n'est pas formé)

Etape 4 : Retourne $Y = \{Y_1, \dots, Y_k\}$

La Figure 3-16 montre le résultat graphique du programme développé sous Matlab appliqué à notre exemple type, c'est-à-dire avec une trajectoire de rayon $r = 100m$ et un rayon de propagation $R_c = 10m$.

Le nombre de nœuds déployés dans cette solution est de 209 nœuds y compris les nœuds de bordure et le puits. Ce résultat peut être comparé avec celui obtenu avec la grille à pavement carré, paragraphe 3.4.2. Le nombre de nœuds était alors de 304 avant le processus d'élimination des nœuds sur les routes redondantes. Le placement par arbre de Steiner est donc plus performant à l'état brut. Mais le processus d'élimination des routes redondantes est alors complexe et nous ne l'avons pas développé. In fine, le placement sur grille à pavement carré et le placement simple sur chemin de bordure sont plus économiques en termes de nombres de nœuds pour obtenir une topologie totalement connectée.

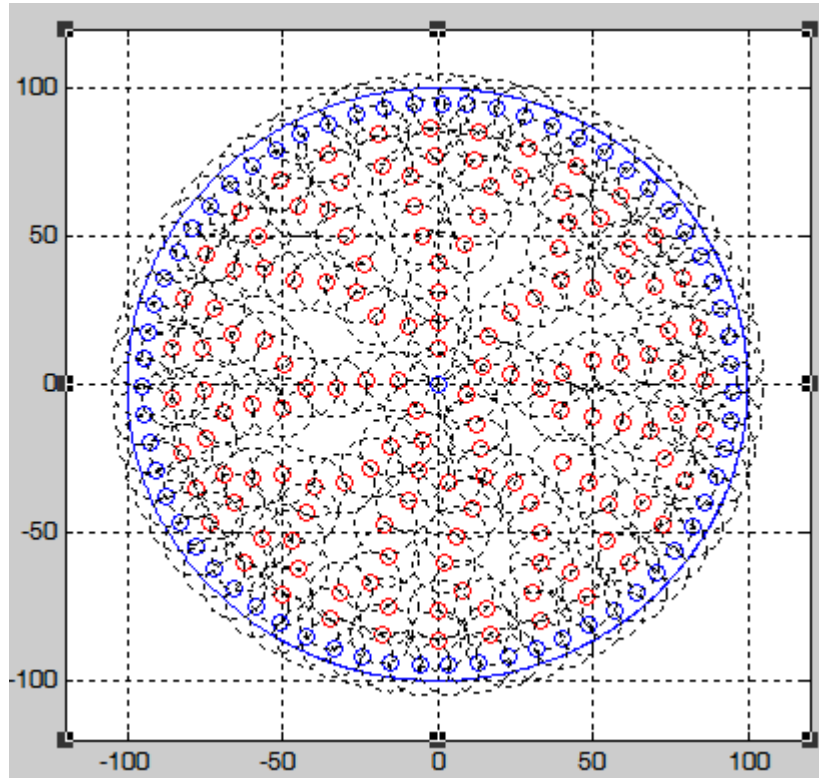


Figure 3-16 Résultat des emplacements des nœuds relais avec l'arbre de Steiner

3.5 Routage pour topologie à relais fixes

Le routage consiste à acheminer les paquets depuis le ou les nœuds capteurs mobiles vers le puits fixe unique. Dans le cas étudié, il faut séparer le routage pour le premier saut c'est-à-dire sur la liaison mobile-fixe du routage pour les autres sauts.

3.5.1 Routage pour le premier saut

Pour chaque nœud capteur, il suffit de diffuser les paquets sans adresse de destination immédiate, c'est-à-dire avec une adresse de niveau liaison « broadcast ». En effet, les topologies proposées sont telles qu'il y a toujours un nœud relais interface à portée radio, c'est-à-dire à une distance inférieure au rayon de communication. Cette technique de diffusion simple évite de gérer le handover, c'est-à-dire de savoir à quel nœud envoyer le paquet. L'inconvénient est qu'il est ainsi possible qu'un paquet soit reçu correctement par plusieurs nœuds interfaces. Pour que la redondance soit détectée et qu'un seul paquet parvienne au puits ou soit conservé par celui-ci, les paquets doivent porter l'adresse du capteur et un numéro de séquence de paquet. Nous proposons de supprimer le numéro de paquet quand celui-ci est horodaté puisque l'horodatage permet alors de détecter les doublons.

3.5.2 Routage dans le réseau fixe.

Le routage dans le réseau fixe peut être statique et paramétré manuellement ou être autogéré. Dans les deux cas il faut d'abord définir un adressage adapté. Routage et adressage dépendent de la topologie et sont donc étudiés dans la suite en fonction de celle-ci pour la grille à pavement carré et pour le chemin de bordure.

3.5.2.1 Adressage et routage dans la topologie à grille à pavement carré optimisée

Dans le cas de la topologie à grille à pavement carré, l'adressage retenu est celui de l'indexation définie avec la topologie donc basé sur les coordonnées cartésiennes du nœud. Une adresse est donc un couple formé des index i, j soit Adresse = $\{i, j\}$ avec i et j des nombres entiers relatifs codés chacun sur 8 bits en complément à deux (une extension sur 16 bits est possible si nécessaire). Dans notre cas, tous les nœuds relais sont placés à des endroits précis et les coordonnées de chacun peuvent être facilement introduites dans le nœud. Il n'y a pas de distinction dans l'adresse entre nœud relais simple et nœud relais interface.

Il est possible de faire un routage hors-ligne et d'introduire manuellement l'adresse du nœud du prochain saut des paquets. Mais ce n'est pas utile, car un routage automatique autonome est facile à réaliser.

La topologie utilisée se prête parfaitement au routage géographique puisqu'un nœud connaît sa position et la position du puits. En l'absence d'obstacle, hypothèse retenue, le routage glouton simple fonctionne parfaitement sans optimum local puisqu'il n'y a pas de trou.

Chaque nœud connaît son Adresse = $\{i, j\}$. Le routage géographique consiste pour ce nœud à envoyer le paquet à son voisin dont l'adresse est « plus petite » c'est à dire :

- Soit Adresse' = $\{i', j'\}$ avec $i' < |i|$
- Soit Adresse' = $\{i, j'\}$ avec $j' < |j|$

Mise en œuvre :

À l'initialisation du réseau, chaque nœud doit découvrir l'adresse de ses voisins à un saut. Pour cela, il diffuse un message [Hello (sa propre adresse)] sans adresse de destination. Remarquons qu'un nœud peut avoir au maximum 4 voisins. Il répète son émission jusqu'à réception d'au moins un message Hello contenant une adresse « plus petite » type « Adresse' ». Une seule adresse répond généralement au critère, elle est mémorisée dans la variable *Addest*. Mais il est possible qu'il y en ait deux. Dans ce cas seule la première adresse reçue sera conservée dans *Addest*.

Le routage est réalisé en envoyant ou en renvoyant tout paquet reçu après avoir placé *Addest* comme adresse de destination.

3.5.2.2 Adressage et routage dans la topologie à chemin de bordure

L'adressage dans la topologie à chemin de bordure est basé sur les coordonnées polaires de rayon déterminé, donc utilisant une seule variable. Pour que le routage soit optimal, il faut utiliser la route la plus courte depuis le nœud jusqu'au puits. Dans ce cas également un routage géographique est la solution la plus simple et optimale puisqu'il n'y a ni trou ni obstacle. L'adressage doit favoriser ce routage. Il est réalisé avec les conventions suivantes :

- Soit + le sens trigonométrique et – le sens horaire.
- Une adresse est constituée de deux variables : le sens (+ ou -) et un index
- Soit +,0 l'adresse du puits, origine du système d'indexation
- Les adresses sont obtenues en incrémentant l'index à partir du puits et en affectant + pour un index calculé dans le sens trigonométrique et – pour un index calculé dans le sens horaire.
- Les adresses sont introduites manuellement comme dans le cas précédent.

Mise en œuvre :

Après l'initialisation de son adresse, chaque nœud relais initialise sa variable *Addest* avec son adresse modifiée par décrémentation de l'index.

Le routage est réalisé en envoyant ou en renvoyant tout paquet reçu après avoir placé *Addest* comme adresse de destination.

3.6 Localisation

Un intérêt d'utiliser une topologie avec des relais fixes est de disposer d'ancres pour la localisation. Tous les nœuds relais interfaces peuvent jouer ce rôle. Compte tenu de cette possibilité et de l'étude bibliographique présentée au chapitre 2, quatre méthodes de localisation semblent pouvoir être retenues : l'utilisation d'un GPS, l'identificateur de cellule, les empreintes RSSI et l'utilisation d'accéléromètres.

3.6.1 Utilisation d'un GPS

Si le système évolue en extérieur et dans une zone dégagée pour éviter « l'effet canyon », l'utilisation d'un GPS pour réaliser la localisation est une solution simple, assez précise, assez robuste et pas très onéreuse comme nous l'avons indiqué. Il n'y a dans ce cas pas de problème particulier sauf à éventuellement prévoir un changement de repère pour exploiter la localisation, mais ceci sera fait dans l'application de surveillance sur l'ordinateur hôte. La localisation peut être codée de différentes manières. Par exemple, avec le standard NMEA (National Marine Electronics Association) types GGA (Global Positioning System Fixed Data) ou GLL (Geographic Latitude Longitude), la représentation est de type : S/N ddmm.mmmm, E/W dddmm.mmmm, chaque caractère (dont le chiffre décimal) étant codé sur un octet. Sauf à faire une conversion des valeurs en binaire pour gagner en taille de représentation, la localisation est alors codée sur 19 octets, taille qu'il faut prévoir dans la charge des paquets de données. De plus ces grandes trames induisent un retard dans le calcul de la position et donc une erreur lorsque le mobile se déplace rapidement.

3.6.2 Identificateur de cellule

Une méthode très simple est de localiser le système mobile au moyen de l'identificateur de sa cellule de communication, en faisant l'hypothèse que l'utilisateur dispose des coordonnées géographiques de l'espace opératoire de cette cellule. La précision dépend alors de la taille de la cellule. La localisation est la portion de trajectoire qui traverse la zone géographique couverte par la cellule.

Dans le système étudié, la notion de cellule n'a jamais été explicitée. Elle correspond de fait à l'espace opératoire, la zone de couverture radio, du *nœud relais interface* qui réceptionne le paquet diffusé par le capteur mobile. Il suffit donc que le champ localisation des données soit rempli non pas par le nœud capteur, mais par le nœud relais interface, par son adresse. Comme indiqué dans le paragraphe sur le routage, il est possible que le paquet soit reçu par deux relais interface quand le mobile se trouve dans une position intermédiaire. Le système de suppression des paquets doublons au niveau du paquet suivant jusqu'au puits inclus va en supprimer un des deux donc la localisation sera affectée à une seule cellule. Le mécanisme de suppression des paquets doublons utilise le numéro de séquence. Un système de localisation plus précis pourrait être réalisé en exploitant ce doublon, mais son utilité ne paraît pas valoir la complexité supplémentaire dans le cas général.

En conclusion, ce système est le plus simple, il ne nécessite ni capteur ni traitement sophistiqué. Dans l'exemple utilisé pour concevoir la topologie, c'est-à-dire une trajectoire de 100 mètres et un rayon de communication de 10 mètres, la précision de localisation est de l'ordre de 10 mètres quelque soit la topologie retenue. Cette précision est certainement suffisante dans beaucoup d'application de surveillance.

3.6.3 Localisation par empreintes du RSSI

Une fois que nous avons fixé les positions du puits et des nœuds relais qui assurent la couverture de la trajectoire dont le rayon est borné entre R_c et $\sqrt{R_c}$, le réseau passe par deux phases avant le déploiement :

Phase 1 : « initialisation » : le puits et les nœuds relais qui sont en regard de la trajectoire sont configurés manuellement. La table de chaque nœud relais contient toutes les informations concernant sa position (x,y), son nom et le numéro de canal.

Phase 2 : Apprentissage, il s'agit de créer une base de données à greffer au niveau du nœud mobile, cette base de donnée sera alimentée automatiquement avec le couple angle β - puissance (cf figure 3-17), sous la forme $(\beta, \langle \text{RSSI}_1, \text{RSSI}_2, \text{RSSI}_3, \text{RSSI}_4 \rangle)$, ou β est l'angle entre l'axe des x et la droite qui passe par le mobile et le puits, et RSSI_i avec $i=1..2$, est la puissance du signal mesuré à l'angle β . Les informations sont rentrées d'une manière séquentielle, afin de faciliter la recherche de l'angle sur le nœud mobile.

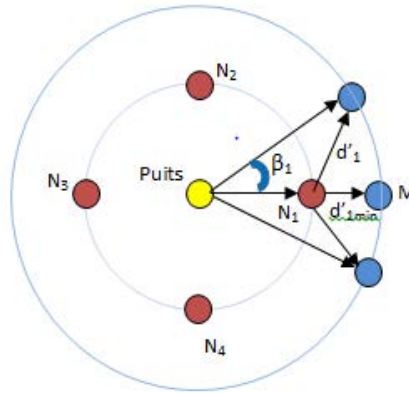


Figure 3-17 Association (β , empreinte du RSSI)

Phase opérationnelle

Après la phase d'apprentissage, le nœud mobile commence à envoyer des paquets HELLO afin de mesurer le RSSI de la réponse et de chercher l'angle qui correspond à cette mesure ; Mais il s'avère qu'il y'a deux lieux de mesure qui ont la même valeur de RSSI : les positions pour les angles β et $2\pi - \beta$ (cf Figure 3-17) . Pour pallier à ce problème, le mobile attend qu'il détecte la puissance de RSSI des nœuds N_{i+1} et N_i . Les RSSIs mesurées sont comparées avec empreintes enregistrées parmi celle-ci, la valeur la plus proche est sélectionnée et sa position associée extraite pour être utilisée.

Malheureusement, les signaux radio sont dispersés, diffractés ou réfléchis par des nouveaux obstacles et même par le déplacement des personnes. Par conséquent, les valeurs d'empreintes digitales varient considérablement d'un jour à l'autre et aussi d'une heure à l'autre. Par conséquent, des mises à jour régulières devraient être effectuées sur l'identification par empreintes, de plus le procédé tient compte de l'imprécision des valeurs.

3.6.4 Localisation à l'aide d'accéléromètres

Comme indiqué dans l'état de l'art, la localisation par système inertiel et accéléromètres est considéré comme la plus sûre et l'un le plus précise. Pour le système physique étudié, évoluant dans un plan et dont la trajectoire est connue, les gyroscopes sont inutiles et il suffit d'utiliser deux accéléromètres pour se localiser. Cette technique paraît très attractive, car les nœuds capteurs utilisés pour les expérimentations, MicaZ de Crossbow, intègrent ces accéléromètres par construction.

Les mesures disponibles en sortie du composant *accéléromètres* sont deux accélérations orthogonales a_x et a_y . Il est intéressant de fixer le composant sur le mobile de telle manière que la première soit l'accélération radiale (centrifuge) et la seconde l'accélération tangentielle. Il en résulte que la position est calculée en coordonnées polaires $\{\theta, r\}$, avec θ angle et r le rayon avec r constant.

Nous avons :

$$a_x = r\dot{\theta}^2$$

$$a_y = r\ddot{\theta}$$

Chacune des deux équations permet d'obtenir θ par intégration. Mais l'intégration à partir de valeurs mesurées est une opération sensible au bruit de mesure. De plus, les accéléromètres ne peuvent jamais être montés parfaitement suivant les axes rayon – tangente de la trajectoire. Il en résulte un biais de mesure.

La disponibilité des deux équations permet d'obtenir une estimation de la position à partir de la moyenne des deux résultats de calcul. Mais l'intégration diverge en raison des erreurs de mesure et il est nécessaire de recalculer la position calculée à chaque tour de la trajectoire, ce qui est facile grâce à un capteur de position sans contact type capteur magnétique qui détecte la position d'un repère fixe qui peut définir l'angle initial $\theta = 0$.

Une plateforme d'expérimentation a été construite pour tester la faisabilité de cette solution.

Elle est constituée d'un bras mobile de rayon 1,5m en rotation entraîné par un moteur électrique (Figure 3-18).

Le nœud capteur sans fil MicaZ est monté à une extrémité; il est doté d'un accéléromètre type ADXL202 (Weinberg et al., 1998) à deux axes (x,y), avec une marge de mesure de ± 2 g. L'ADXL202 peut mesurer à la fois une accélération dynamique (par exemple, les vibrations), et une accélération statique (par exemple la gravité). Il est monté comme l'indique la photo reproduite sur la Figure 3-19.

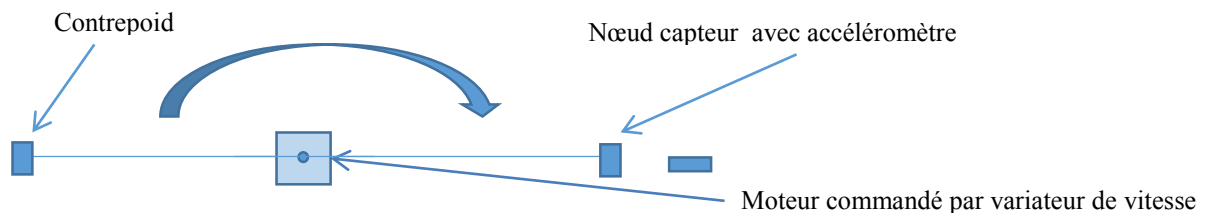


Figure 3-18 Schéma de la plateforme.

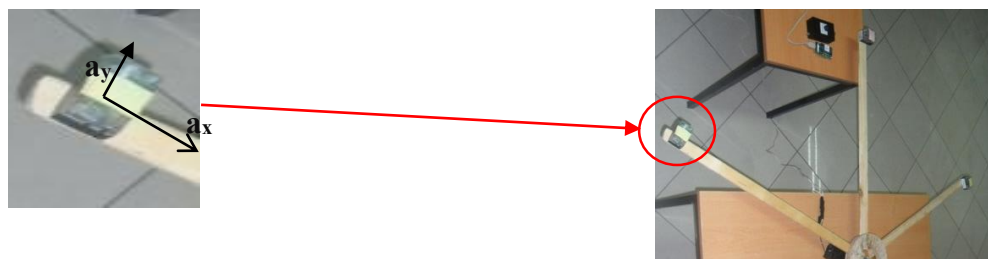


Figure 3-19 Repère lié à l'accéléromètre

Le capteur mobile mesure l'accélération (a_x et a_y) chaque 0,5s, le mobile envoie les deux mesures « l'accélération et l'état du capteur magnétique tout ou rien » vers le PC.

Les mesures réalisées avec une vitesse constante sont présentées sur la Figure 3-20. Le traitement de ces mesures n'a pas permis d'obtenir la position avec une précision et une répétabilité correcte. Il faudrait réaliser un traitement plus sophistiqué des mesures, par exemple avec un filtre de Kalman qui est très souvent utilisé dans les systèmes de positionnement par capteurs inertiels.

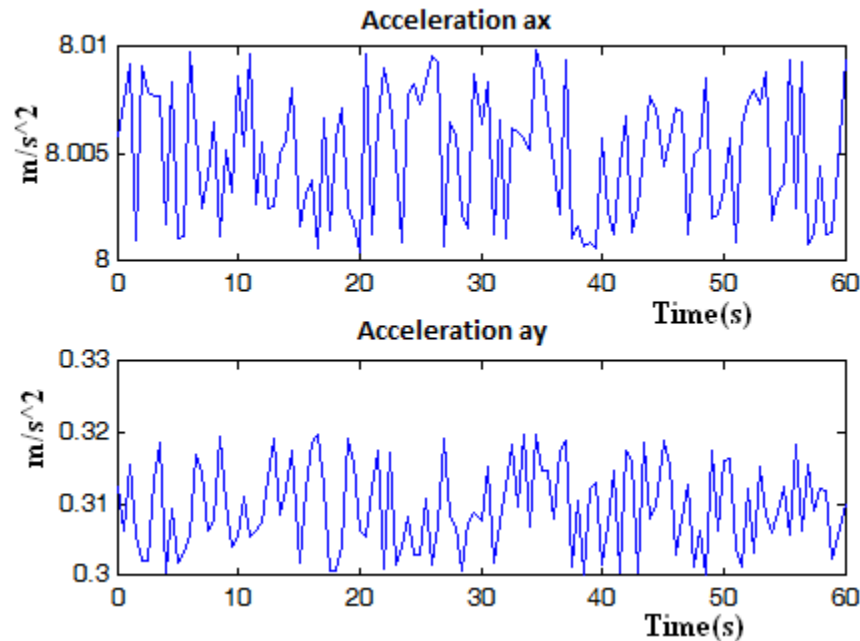


Figure 3-20 Mesure des accélérations radiales et tangentielles

3.7 Analyse de performances

3.7.1 Modèle de simulation et critères de performances.

Nous évaluons les performances de nos approches avec des modules développés sur le simulateur OPNET Modeler 16.0 (OPNET, 2014). Nous utilisons la couche physique définie dans la norme IEEE 802.15.4 - 2004 (Ergen, 2004) qui opère dans les bandes de fréquences autour de 2,4 GHz, avec un débit de 250kb/s. La portée radio est ajustée dans chacun des deux cas respectivement à 10 mètres et à 20 mètres par une série d'essais de puissance variable. Nous avons utilisé le modèle de la consommation énergétique défini dans la page web Open-ZB (Cunha et al., 2007). Pour la couche MAC, nous avons adopté celle définie dans la norme et le protocole CSMA/CA non slotté et non beacon active. Les modèles développés correspondent au nœud choisi, le MicaZ de la firme CrossBow. Les messages ont été formés avec une charge de 20 octets.

Les critères de performance retenus sont la charge supportée (ou taux de génération de paquets) pour un taux de livraison des paquets supérieur à 95% et le délai d'acheminement.

Tous les résultats indiqués dans cette thèse sont obtenues par moyenne des résultats de 30 simulations.

3.7.2 Evaluation sur l'exemple

L'exemple utilisé pour illustrer la conception des différentes topologies est d'abord repris pour évaluer les performances des architectures proposées. Il s'agit donc d'une trajectoire circulaire de rayon 100 mètres avec des nœuds ayant un rayon de propagation de 10 mètres. La durée de la simulation a été fixée à 5 minutes après différents essais, car une durée plus longue n'apporte aucune information supplémentaire. Les paquets reçus en double sont supprimés.

La topologie retenue en premier est celle sur une grille à pavement carré avec suppression des nœuds redondants sans augmenter la distance en utilisant l'algorithme présenté dans le paragraphe 4.2. Le routage est réalisé avec la méthode géographique proposée. Deux types de systèmes mobiles sont mis en œuvre sur cette trajectoire pour l'évaluation : un avec un seul capteur tournant à vitesse fixe, l'autre avec 10 mobiles à même vitesse portant chacun un nœud capteur. L'influence de la vitesse de déplacement a été étudiée pour le capteur seul.

3.7.2.1 Topologie sur une grille à pavement carré optimisée et un seul capteur

La Figure 3-21 montre la topologie utilisée avec le puits au centre du cercle de la trajectoire et le capteur mobile sur cette trajectoire.

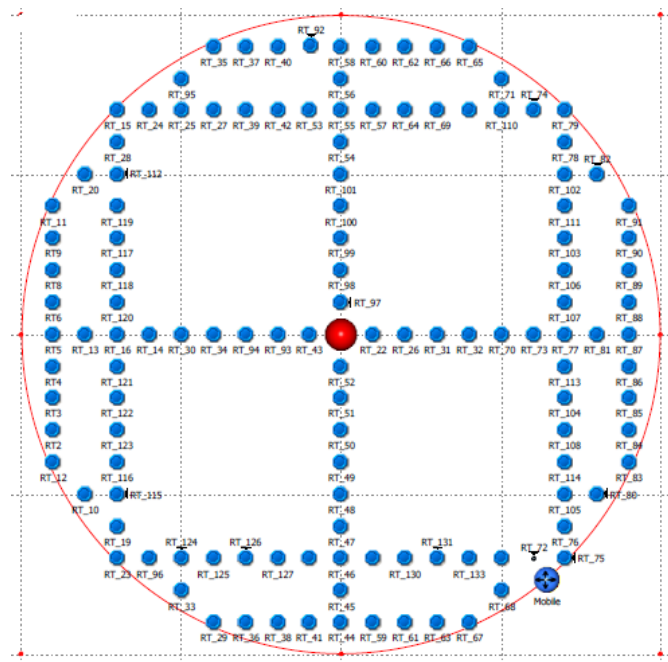
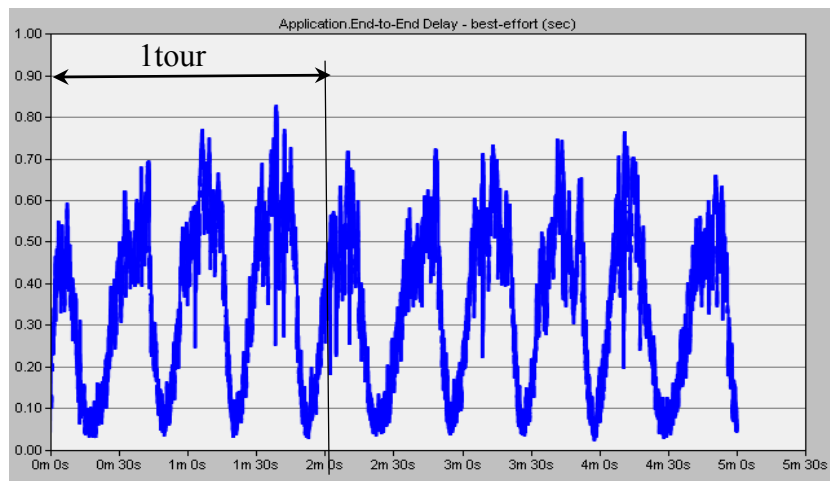


Figure 3-21 Topologie de l'exemple sur grille à pavement carré optimisée et un capteur

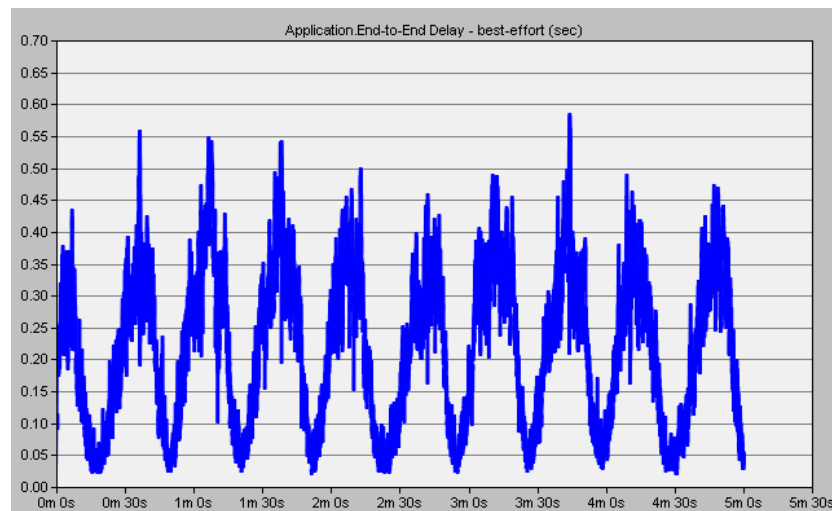
Vitesse de déplacement de 5m/s soit environ 0,5tr/min.

Les simulations ont été faites pour des périodes de génération de paquets de 10ms, 20ms, 25ms, 27ms, 30ms, 50ms, 100ms et 1s. Les résultats relatifs à la charge supportée, déduite par la mesure du taux de perte de paquets effectuée sur la durée de simulation (5min), sont donnés dans le tableau 3.1. Le taux de perte descend en dessous de 1% lorsque la période de génération

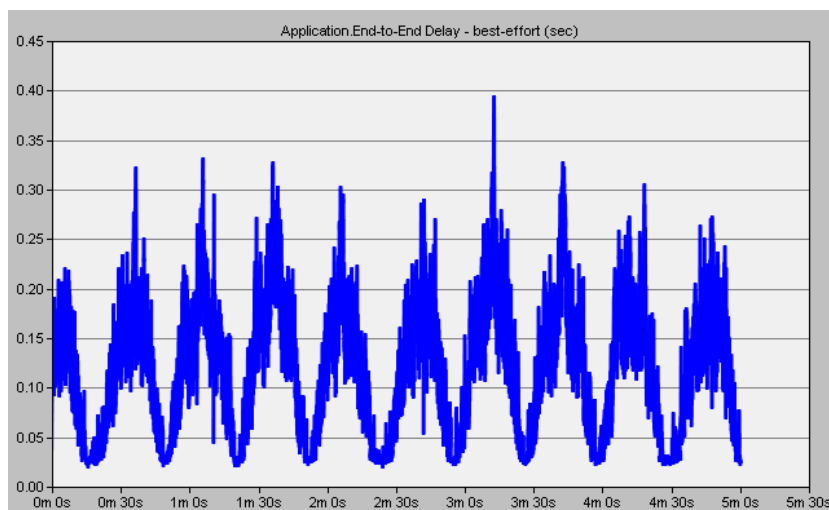
de paquets est au moins égale à 27 ms. Le taux de perte est inférieur à 5% à partir de 25 ms. Mais l'analyse des courbes des délais d'acheminement de bout en bout à des valeurs de période pour lesquelles le fonctionnement devient satisfaisant (Figure 3.22) montre **que le fonctionnement est très fluide à partir d'une période de 30 ms**, avec un abaissement de ce délai à une valeur moyenne de 150 ms environ et une valeur maximale un peu inférieure à 400 ms. Le délai descend à une valeur moyenne de 35 ms à partir d'une période inter-paquets de 50 ms.



(a) Période inter-paquets = 25 ms



(b) Période inter-paquets = 27 ms



(c) Période inter-paquets = 30 ms

Figure 3-22 Délais de bout en bout pour un capteur et 3 valeurs de période inter-paquets

Un seul capteur mobile, vitesse de déplacement 5 m/s				
temps inter-paquet	Paquets émis (nombre)	Paquets reçus (nombre)	Paquets perdus (nombre)	Paquets perdus (%)
10ms	30000	12095	17905	59,68%
20ms	15000	12029	2971	19,81%
25ms	12000	11583	417	3,48%
27ms	11111	11001	110	0,99%
30ms	10000	9988	12	0,12%
40ms	7500	7494	6	0,08%
50ms	6000	5996	4	0,07%
100ms	3000	2999	1	0,03%
1s	300	300	0	0,00%

Tableau 3-1 Tenue à la charge pour un capteur et une vitesse de 5m/s

Vitesse de déplacement de 28 m/s (environ 100 km/heure soit 2,67tr/min)

Les résultats montrant une assez faible influence de la vitesse de déplacement sur les performances du réseau, seuls deux périodes ont été retenues pour les simulations (tableau 3.2). On constate malgré tout une légère dégradation des performances. La dégradation serait sans doute plus importante à vitesse vraiment élevée, plusieurs centaines de km/h, pour laquelle l'effet Doppler et les nombreux changements de relais en cours de transmission d'un paquet auraient un effet perceptible. Rappelons qu'il a été montré que le rayon de propagation d'un nœud mobile doit être augmenté avec sa vitesse pour conserver le même taux de délivrance des paquets (Royer et al. 2001).

Un seul capteur mobile, vitesse de déplacement 28 m/s				
Temps inter-paquet	Paquets émis (nombre)	Paquets reçus (nombre)	Paquets perdus (nombre)	Paquets perdus (%)
50ms	6000	5973	27	0,45%
1s	300	296	4	1,33%

Tableau 3-2 Tenue à la charge pour un capteur et une vitesse de 28 m/s

3.7.2.2 Topologie sur une grille à pavement carré optimisée et 10 capteurs

La topologie du réseau fixe reste identique au cas précédent, mais le réseau est étendu sur sa partie embarquée qui comprend dix capteurs (Figure 3-23). Ces capteurs envoient directement leurs paquets aux relais interfaces au sol. Les simulations sont réalisées pour une vitesse de déplacement de 5 m/s avec différentes périodes de génération des paquets. Le tableau 3.3 montre le taux de perte des paquets en fonction de cette période, donc la tenue du réseau à une charge répartie. Les résultats montrent que le réseau est sensiblement moins performant avec une charge répartie qu'il l'est avec une charge localisée. En effet, pour 3000 paquets émis par l'ensemble des capteurs pendant les 5 minutes de simulations avec une période de génération de 1 s soit une charge de 10 paquets/s, 160 paquets sont perdus donc le taux de perte est de 5,33% alors qu'un seul paquet est perdu si les 3000 paquets sont émis par un seul capteur avec une période de 100 ms soit la même charge de 10 paquets/s (tableau 3.1). Le délai moyen est légèrement allongé, mais le délai maximal est plutôt plus faible sans doute en raison d'une élimination des paquets entrant plusieurs fois en collision au même endroit (figure 3-24). L'explication est probablement que comme les paquets arrivent au puits par les quatre routes à la fois, le puits est un goulot d'étranglement du réseau. Les paquets y arrivent de manière synchrone et donc rentrent en collision pour ce dernier saut alors qu'ils sont séquencés au départ dans le cas d'un seul capteur avec une période dix fois plus petite.

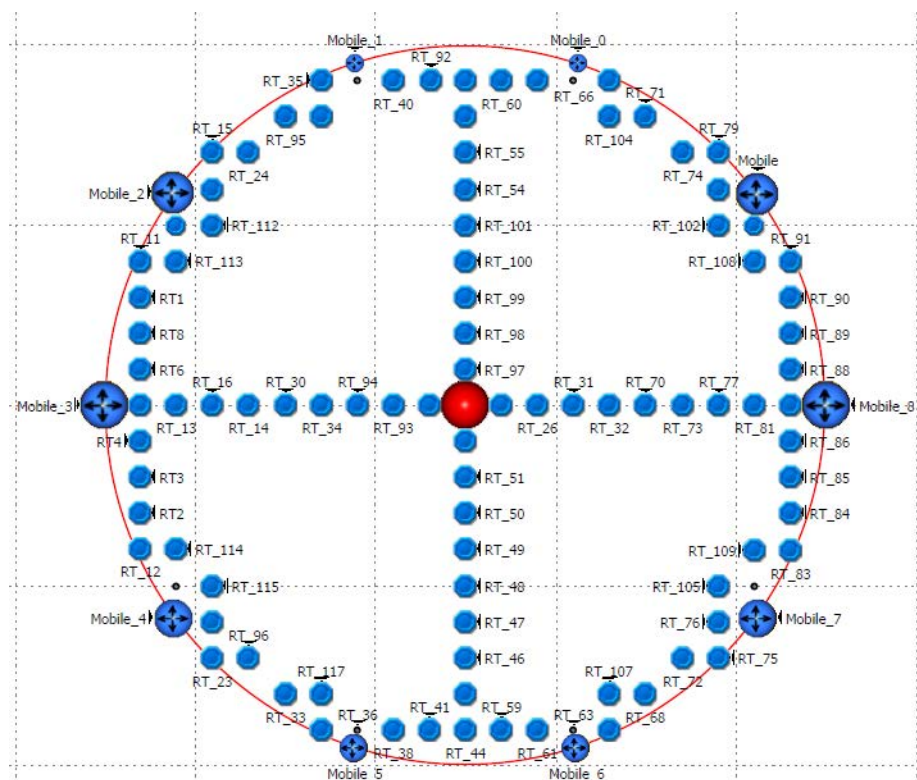


Figure 3-23 Topologie de l'exemple sur grille à pavement carré optimisée et dix capteurs

10 capteurs mobiles, vitesse de déplacement 5 m/s				
temps inter-paquet	Paquets émis (nombre)	Paquets reçus (nombre)	Paquets perdus (nombre)	Paquets perdus (%)
1s	3000	2840	160	5,33%
5s	600	571	29	4,83%
10s	300	293	7	2,33%
15s	200	195	5	2,50%
20s	150	147	3	2,00%
30s	100	98	2	2,00%

Tableau 3-3 Tenue à la charge pour dix capteurs.

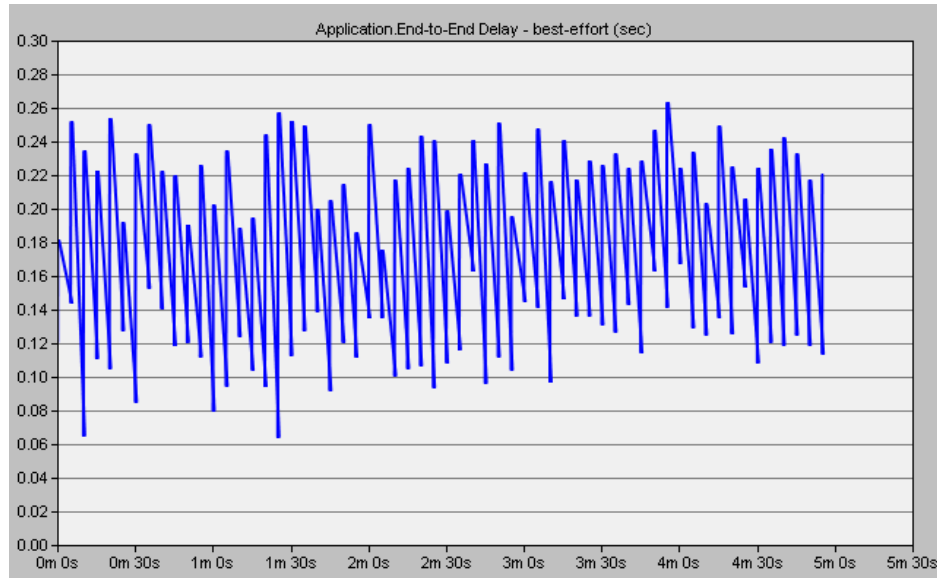


Figure 3-24 Délai de bout en bout pour 10 capteurs et une période inter-paquet de 5 s

3.7.2.3 Topologie avec relais fixes sur bordure et un capteur

L'évaluation de l'architecture proposée par sa composante topologie au paragraphe 4.3 et par son routage au paragraphe 5.2.2 a été réalisée suivant la même approche, pour un seul capteur mobile. La topologie est illustrée par la figure 3.25 avec le choix dans cet exemple des relais placés en bordure intérieure à la trajectoire. A noter que cette architecture n'est pas évaluée pour 10 capteurs mobiles, car elle n'a pas de sens, il faut alors lui préférer l'architecture basée sur une topologie de relais embarqués telle que présentée au chapitre 4. Les résultats de tenue à la charge pour une vitesse de déplacement de 5 m/s sont présentés dans le tableau 3.4. La tenue à la charge est sensiblement moins bonne que celle d'une architecture utilisant une topologie sur grille. Les délais d'acheminements sont naturellement très variables en fonction de la position du mobile et atteignent environ 100 ms pour une période inter-paquets de 100 ms (figure 3.26 a et b) alors que la valeur maximale est de 50 ms pour la même période inter-paquets avec la topologie sur grille. Il faut rappeler toutefois que la topologie avec relais fixes sur bordure utilisent 63 nœuds contre 128 pour la topologie sur grille à pavé carré. Enfin la tenue à la charge a été testée pour une vitesse de déplacement de 28 m/s. Les résultats sont très proches de ceux obtenus pour la vitesse de 5 m/s, il n'est pas utile de les présenter.

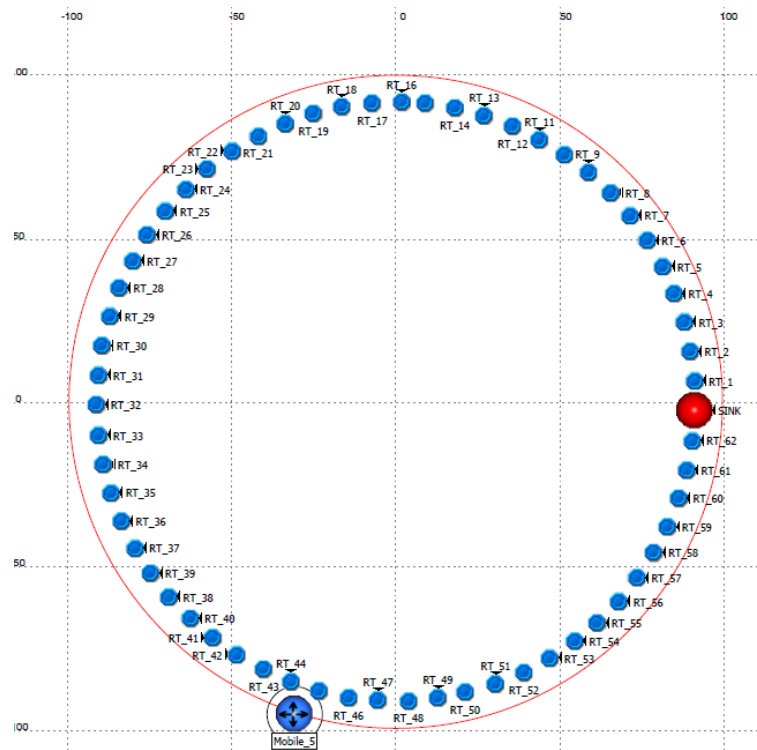
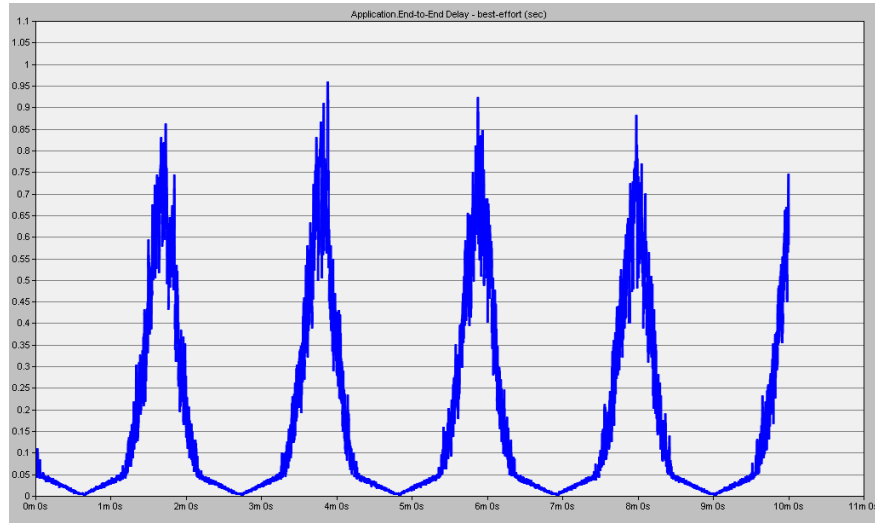


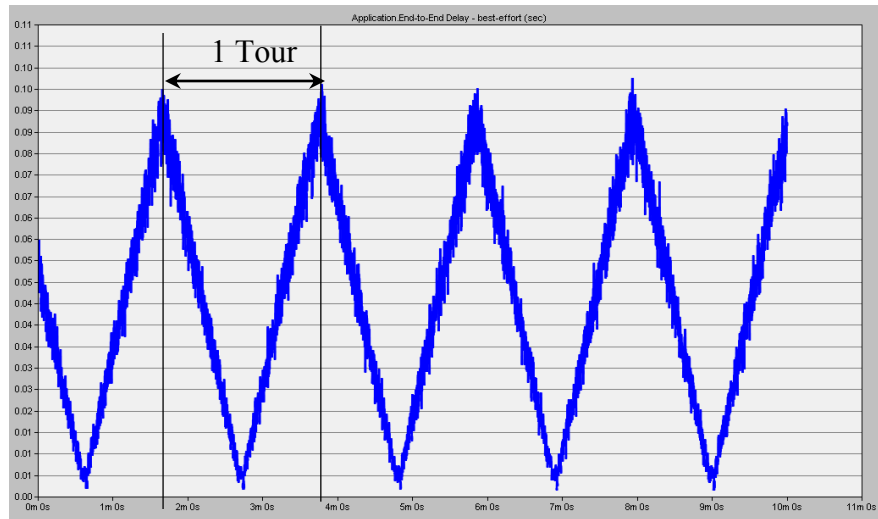
Figure 3-25 Topologie avec relais en bordure de la trajectoire

Relais de bordure, un capteur mobile, vitesse de déplacement 5 m/s Durée de simulation 10 minutes				
temps inter-paquet	Paquets émis (nombre)	Paquets reçus (nombre)	Paquets perdus (nombre)	Paquets perdus (%)
10ms	60000	20451	39549	65,91%
20ms	30000	19959	10041	33,47%
50ms	12000	11670	330	2,75%
100ms	6000	5998	2	0,03%
1s	600	600	0	0,00%

Tableau 3-4 Tenue à la charge une topologie à relais de bordure



(a) Période inter-paquet de 50 ms



(b) Période inter-paquet de 100 ms

Figure 3-26 Délai de bout en bout avec topologie de bordure

3.7.2.4 Evaluation par simulation sur la grande roue Singapore Flyer

Seule la topologie en grille à pavement carré est évaluée, mais sur deux cas : un capteur embarqué dans une seule nacelle et un capteur embarqué dans chacune des 28 nacelles. Pour que les résultats soient comparables avec ceux de la topologie de relais embarqués étudiée au chapitre suivant, la portée radio des nœuds est fixée à 20 mètres. Rappelons que la roue tourne approximativement à la vitesse de deux tours/heure soit 0,0035 rad/s ou 0,24m/s.

Une seule nacelle instrumentée

La topologie est décrite sur la figure 3.27 pour un seul capteur. Le puits est placé au centre (à proximité) et il est nécessaire de placer 28 nœuds relais dans l'infrastructure de la roue. Ils seront dits *au sol* car liés statiquement au sol mais sont en fait en l'air, dans un plan parallèle à la roue.

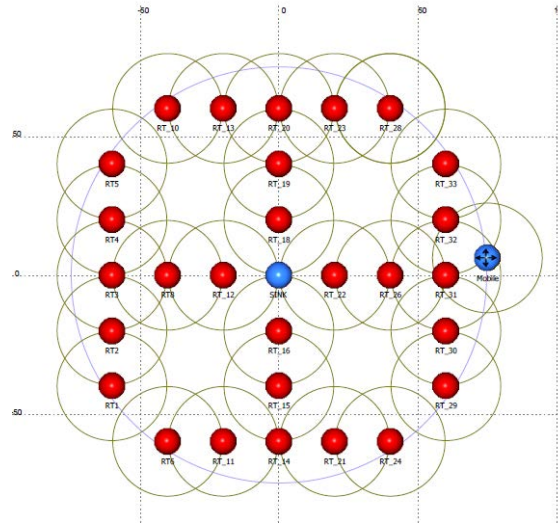


Figure 3-27 Topologie pour la surveillance d'une nacelle de la roue Singapore Flyer

La tenue à la charge a été évaluée en générant périodiquement les paquets. 5 valeurs de période ont été choisies : 1 s, 100 ms, 50 ms, 20 ms et 10 ms. Les résultats relatifs au taux d'arrivée des paquets sont reportés dans le tableau 3.5. La conclusion est que le réseau fonctionne très bien avec une période de génération des paquets au moins égale à 20 ms.

Période de génération des paquets	Nombre de paquets émis	Nombre de paquets reçus	% paquets écartés
10ms	209981	188833	10,07%
20ms	104991	104990	0,001% <1%
50ms	41997	41996	0,002% <1%
100ms	20999	20998	0,004% <1%
1s	2100	2100	0,000%

Tableau 3-5 Tenue à la charge pour un seul capteur

Le délai d'acheminement des paquets a aussi été mesuré par le simulateur. Pour une période de génération de paquets de 100 ms, les résultats sont visualisés sur la figure 3.28. Le délai varie

naturellement en fonction du nombre de sauts réalisés. La viabilité de délai d'acheminement à chaque instant se traduit par une courbe épaisse.

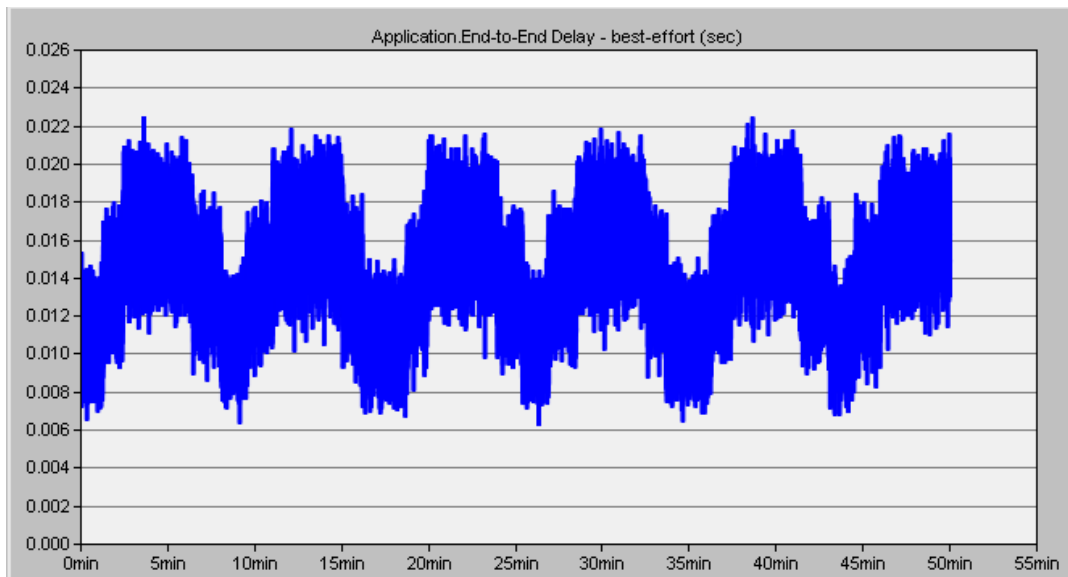


Figure 3-28 Délai d'acheminement pour une période inter-paquet de 100 ms.

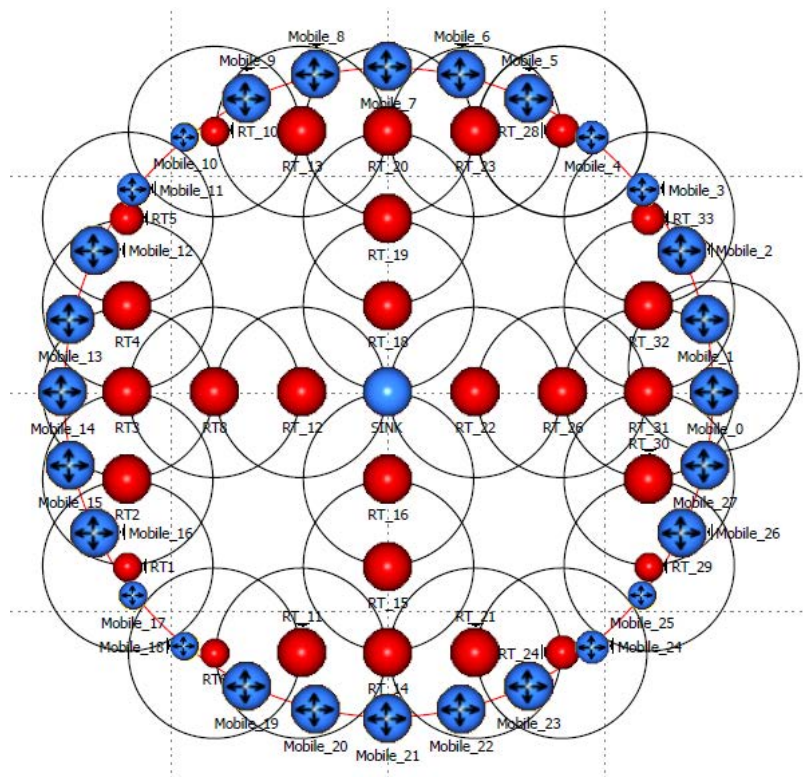


Figure 3-29 Topologie avec un capteur par nacelle

Toutes les nacelles instrumentées

Pour un capteur par nacelle, la topologie est décrite par la figure 3.29. La tenue à la charge est également évaluée en générant des paquets périodiquement, mais les périodes choisies sont alors : 1s, 5s, 10s, 15s, 20s, 25s, 30s. Les résultats sont reportés dans le tableau 3.6. La conclusion est que le réseau fonctionne bien (moins de 5% de perte) avec une période de génération des paquets au moins égale à 20 s. Le délai d'acheminement des paquets a aussi été mesuré par le simulateur. Pour une période de génération de paquets de 20s, les résultats sont visualisés sur la figure 3.30. Le délai varie naturellement en fonction du nombre de sauts réalisés.

Période de génération des paquets	Nombre de paquets émis	Nombre de paquets reçus	% paquets écartés
1s	58800	48147	18,11%
5s	11760	9963	15,28%
10s	5880	5236	10,95%
15s	3920	3655	6,76%
20s	2835	2717	4,16%
25s	2352	2279	3,10%
30s	1960	1902	2,95%

Tableau 3-6 Tenue à la charge pour 28 capteurs

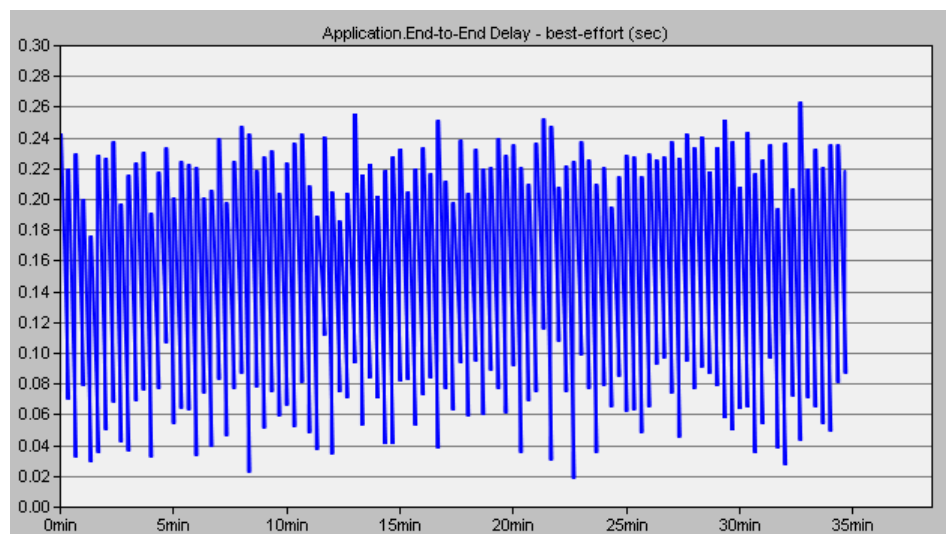


Figure 3-30 Délai d'acheminement pour une période inter-paquet de 20 s avec 28 capteurs

3.8 Conclusion

Les systèmes se déplaçant sur une trajectoire circulaire ont servis de support à une étude approfondie d'architecture de réseau de capteurs utilisant une topologie de relais au sol. Les trois composantes de l'architecture ont été étudiées : la topologie, le routage et la localisation. Les travaux ont permis de proposer trois structures de topologies et de proposer des méthodes de calcul des emplacements des nœuds pour chacune d'elles.

Un protocole de routage géographique est particulièrement bien adapté pour toutes les topologies retenues. D'une part la position du puits est connue de tout nœud et est fixe. D'autre part, les topologies ont la caractéristique que tout nœud, sauf celui pouvant communiquer avec le puits, a un voisin plus proche du puits que lui et que ce voisin possède la même propriété. Cette récursivité permet à l'algorithme glouton d'être globalement optimal.

Plusieurs solutions de localisation sont utilisables sur cette architecture. Suite à l'étude bibliographique nous préconisons particulièrement quatre : l'utilisation d'un GPS, identificateur de cellule, les empreintes RSSI et l'utilisation d'accéléromètres. La plus simple est d'utiliser l'identificateur du relais interface qui reçoit le paquet venant du capteur mais elle est peu précise. Elle peut être suffisante pour certaines applications de surveillance puisque la zone de localisation est une portion de la trajectoire ayant une longueur égale au maximum à deux fois le rayon de propagation soit de quelques dizaines à une centaine de mètres. Une autre méthode peut être choisie en fonction du contexte, de la précision requise et des moyens financiers disponibles.

Deux des architectures proposées ont été évaluées sur deux critères de performances : le premier est la tenue à la charge ou plus précisément la période minimale de génération de paquets de charge fixe de 20 octets conduisant à un taux acceptable de perte des paquets et le deuxième le délai d'acheminement des paquets. Les évaluations ont été réalisées par simulation sous OPNET. Les résultats montrent que les architectures proposées sont assez performantes et fournissent une qualité de service certainement suffisante pour de nombreuses applications de surveillance.

L'utilisation d'une topologie de relais au sol présente l'inconvénient majeur de nécessiter l'acquisition et le déploiement de nœuds de réseau pour le seul rôle de relayage des paquets. C'est indispensable pour un système isolé mais pas pour un système monolithique ou un système distribué. Nous allons étudier dans le chapitre suivant une architecture à base de relais embarqués qui peut être une solution alternative intéressante.

Chapitre 4 : Topologie de relais embarqués pour un système mécanique mobile sur une trajectoire circulaire

4.1	Introduction	76
4.2	Topologie avec relais embarqués	76
4.3	Proposition d'un routage dynamique adapté	78
4.4	Evaluation des performances	81
4.4.1	Méthode.....	81
4.4.2	Résultats	83
4.5	Conclusion.....	86

4.1 Introduction

Hors le cas particulier de la liaison permanente entre le ou les capteurs et le puits, qui concerne les systèmes physiques de taille réduite ou l'ajout de modules de transmission à grande portée par exemple les modules XBeepro (Wang, JingXia et al., 2011), la liaison sol-mobile est réalisée soit au niveau du ou des capteurs soit au niveau du puits. Le premier cas a été étudié dans le chapitre précédent. Le deuxième cas implique de déployer des relais embarqués à bord du mobile, Une topologie avec des relais embarqués est intuitivement bien adaptée à certains types de systèmes physiques. C'est particulièrement le cas des grands systèmes distribués ou des grands systèmes monolithiques. Un exemple du premier type est un télésiège ou un transporteur aérien de matériaux, étiqueté TLF – SD avec notre nomenclature. Un exemple du deuxième type est une grande roue actuellement comme celle qui a servi de support d'application virtuelle dans le chapitre précédent à savoir la *Singapore Flyer*. C'est ce système, étiqueté TC-SM, qui est aussi utilisé dans ce chapitre comme support d'application virtuelle, ce qui permettra de faire une comparaison entre les deux types de topologies sur un système mécanique de ce type pour lequel les deux solutions sont alternatives. Nous conservons les hypothèses du chapitre précédent concernant l'unicité des rayons de communication R_c , le modèle idéal de propagation et la géométrie dans un plan. Nous allons successivement étudier la topologie du réseau, le routage dynamique adapté à cette topologie puis l'évaluation de performance de l'architecture proposée.

4.2 Topologie avec relais embarqués

Lorsque le système physique est de grande taille, il peut supporter des nœuds relais distribués spatialement. Les nœuds capteurs peuvent avantageusement jouer ce rôle pour éviter d'ajouter des nœuds en plus de ceux nécessaires à l'acquisition de mesures. Notons toujours NRC_i un nœud qui assume soit une fonction unique de capteur ou de relais ou la double fonction capteur et relais.

Rappelons tout d'abord les caractéristiques imposées à cette topologie :

- la liaison fixe-mobile est située au niveau du puits;
- les relais NRC_i forment un réseau embarqué avec des contraintes à savoir :

(a) assurer une connexion permanente dans le réseau de relais embarqués donc formellement :

$$\forall NRC_i, \exists NRC_j \text{ tel que Distance}(NRC_i, NRC_j) < R_c$$

(b) assurer une connexion mobile fixe permanente donc que le capteur ou un relais quelconque soit situé en permanence à une distance du puits inférieure au rayon de propagation, donc formellement avec t représentant le temps :

$$\forall t, \exists NRC_i \text{ tel que Distance}(NRC_i, \text{puits}) < R_c.$$

Soit un système physique constitué d'une grande roue de diamètre r , avec N nacelles réparties uniformément sur sa périphérie. Chaque nacelle est équipée d'un nœud qui peut jouer soit le simple rôle de capteur (pour une seule nacelle), soit le simple rôle de relais (pour les

autres nacelles), soit le double rôle (cas général). La topologie du réseau embarqué est donc invariante. Les nœuds suivent tous la même trajectoire. Le puits au sol est situé légèrement à l'extérieur de la trajectoire des nacelles donc à une distance de celle-ci très inférieure au rayon de propagation. La valeur de la distance fixe entre les nœuds permet d'ajuster le rayon de propagation ou de vérifier la faisabilité dans un cas extrême.

Soit N le nombre de nacelles (donc de nœuds). Soit 2α l'angle entre deux rayons consécutifs de nacelle. On a (Figure 4-1):

$$2\alpha = \frac{2\pi}{N}$$

$$\text{Donc } \alpha = \frac{\pi}{N}$$

$$\sin(\alpha) = \frac{Rc}{2r} \text{ donc } \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) = \frac{Rc}{2r}$$

$$\text{Donc : } Rc = 2r \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)$$

Il s'agit d'une valeur minimale, il faut donc régler la puissance d'émission des nœuds pour que Rc soit un peu plus grand, mais pas trop grand pour éviter les interférences entre nœuds. Le réglage de Rc est facile en simulation avec le modèle de propagation retenue (disque). Il nécessiterait des essais délicats dans la réalité.

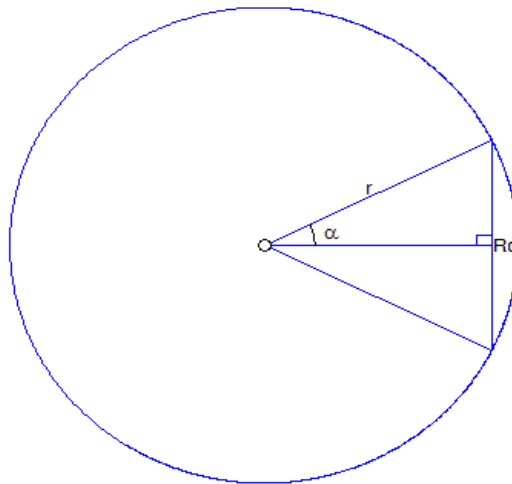


Figure 4-1 Calcul du rayon de propagation Rc

Exemple : La Singapore Flyer a un rayon de 75 mètres et possède 28 nacelles. On a donc :

$$Rc = 2 * 75 * \sin(\pi/28) = 16,8 \text{ mètres.}$$

La puissance d'émission peut donc être réglée pour obtenir un rayon de propagation de 20 mètres, par exemple. Cette valeur permet d'atteindre le puits, par exemple situé à un mètre à l'extérieur de la trajectoire, sans problème par le relais mobile le plus proche. Pour une grande partie des positions de la roue le puits est dans la cellule de l'un ou l'autre des deux relais qui sont situés de part et d'autre du rayon OS (figure 4 .3), avec O le centre de rotation de la roue et S le puits (Sink).

À noter que cette topologie ne coûte aucun nœud relais lorsque toutes les nacelles sont instrumentées, c'est-à-dire quand chaque nœud est capteur.

Adressage

Chaque nœud est doté d'une adresse qui va permettre des échanges de paquets en mode *unicast*. Une adresse est simplement constituée d'un nombre codé sur un octet, ce qui est suffisant pour la plupart des systèmes. Mais rien n'empêche de coder sur deux octets si nécessaire.

L'attribution de l'adresse est faite manuellement. Les nœuds forment une chaîne fermée. Un nœud quelconque est choisi comme origine, l'adresse de valeur zéro lui est attribuée. La chaîne de nœuds est parcourue dans un sens quelconque ou plus logiquement dans le sens du mouvement du système si celui-ci est toujours orienté dans le même sens. L'adresse est incrémentée pour chaque nœud successif jusqu'au dernier qui ferme la boucle, un voisin du nœud initial. Par exemple dans le cas de la roue Singapore Flyer, les adresses des nœuds sont donc : 0, 1, 2, ..., 27.

Table des voisins

Le système d'adressage permet à un nœud d'affecter automatiquement les adresses de ses deux voisins auxquels il est susceptible d'envoyer des paquets : celui d'adresse immédiatement supérieure à la sienne, étiquetée Addest+, pour l'un et celui d'adresse immédiatement inférieure pour l'autre, étiquetée Addest-. Mais ce principe ne fonctionne pas pour le nœud d'adresse zéro en ce qui concerne son nœud d'adresse inférieure qu'il ne peut pas connaître à priori. Un protocole de découverte des nœuds voisins est très simple à mettre en œuvre, mais une configuration manuelle de la table est aussi très facile à réaliser et c'est ce qui a été utilisé pour nos expérimentations.

4.3 Proposition d'un routage dynamique adapté

Le réseau de capteur mobile ainsi constitué a une topologie dynamique, mais cette topologie peut être connue et prédite à tout instant à condition de connaître la localisation exacte du mobile. Cette localisation peut être obtenue par différents moyens comme ceux décrits au chapitre 2, paragraphe 2.6.5. Toutefois, un inconvénient important de la topologie avec relais embarqués est de ne pas disposer d'ancres au sol, hormis le puits, pour réaliser une localisation à partir des signaux émis ou reçus par celles-ci. On supposera donc dans la suite que les nœuds mobiles disposent d'une localisation suffisamment précise pour le bon fonctionnement du routage proposé et pour l'application de surveillance. Celle-ci pourra notamment être obtenue par un capteur de position dédié, ou par intégration de la mesure d'un odomètre ou par double intégration de la mesure d'un accéléromètre, avec filtrage et recadrage à chaque tour.

A tout instant chaque nœud, hormis celui qui est le plus proche du puits et qui peut ainsi directement lui envoyer ses paquets, dispose de deux routes pour atteindre le puits : une route dans laquelle le transfert des paquets est réalisé dans le même sens que le déplacement du mobile, appelée route « vers l'avant » et une route dans laquelle le transfert des paquets est réalisé dans le sens inverse au déplacement du mobile, dite route « vers l'arrière » (Figure 4-2).

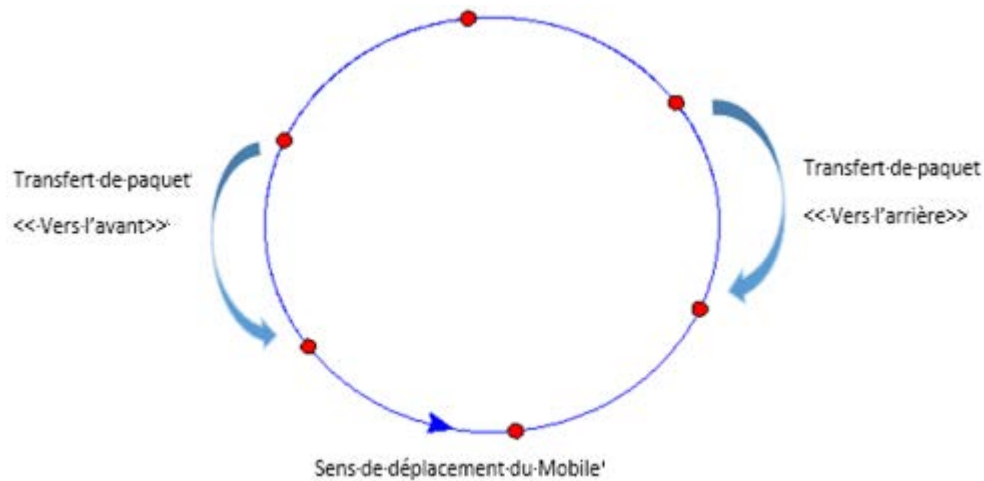


Figure 4-2 Sens de transfert des paquets et sens de déplacement du mobile

Pour chacune de ces routes, dans le cas d'une trajectoire circulaire, le routage optimal est de type géographique **si on néglige** la vitesse de rotation du mobile. En effet, le plus court chemin vers le puits, depuis n'importe quel nœud, est celui passant par le nœud voisin le plus proche du puits.

Algorithme formel de routage

Soit la situation des nœuds et du puits décrite sur la Figure 4-3, avec O le centre du cercle représentant la trajectoire et S le puits. La position de chaque nœud peut être avantageusement définie en utilisant un système de coordonnées polaires avec l'axe OS et l'angle θ entre le rayon passant par ce nœud et l'axe OS. Soit N le nombre de nœuds embarqués membres de la chaîne (tous a priori).

Dans chaque nœud, pour tout paquet à envoyer.

Algorithme 2 : Algorithme de routage

faire

Si $\theta < \pi/N$ ou $\theta > \pi(2N-1)/N$, diffuser pour tous

Sinon

Si $\theta < \pi$, envoyer à Addest-

Sinon envoyer à Addest+

Fin si

Fin si

Prise en compte de la vitesse de déplacement du mobile

Si le mobile tourne avec une vitesse assez élevée, et/ou si le nombre de nœuds est grand, il **faut tenir compte de cette vitesse** pour optimiser le routage. En effet la longueur du chemin dans le sens « vers l'avant » diminue pendant le transfert d'un paquet à travers les différents nœuds relais et corolairement celle du chemin « vers l'arrière » augmente. Il faut donc estimer cette différence de longueur pour en tenir compte à priori lors du routage depuis le nœud producteur des informations du paquet. Cette estimation est basée sur le nombre k de sauts que devrait faire le paquet et la durée moyenne T d'un saut. Il faut noter que cette durée moyenne doit être mesurée ou estimée avec précaution, en vérifiant que l'écart type est faible. Elle dépend essentiellement du débit de la transmission et du protocole utilisé au niveau MAC, plus légèrement du protocole de routage si notre solution est utilisée, car elle est peu coûteuse en temps de traitement. Cette valeur est enregistrée comme un paramètre du protocole de routage géographique proposé.

Cette prise en compte de la vitesse conduit à l'algorithme suivant de routage dans chaque nœud.

Considérons A ce nœud, non proche du puits, et ses voisins B et C (Figure 4-3).

Soit T la durée moyenne d'acheminement (transmission plus traitements d'émission et de réception) d'un paquet à un saut ; soit N le nombre de nœuds membres de la chaîne et θ' la vitesse angulaire de rotation du mobile.

Si le nœud A choisit la route *vers l'avant*, le nœud C va recevoir le paquet lorsque sa position sera : $P_C = \theta + 2\pi/N + \theta' \cdot T$

De la même manière, si la route *vers l'arrière* est choisie, le nœud B va recevoir le paquet lorsque sa position sera : $P_B = \theta - 2\pi/N + \theta' \cdot T$

En généralisant, après k sauts le paquet atteint le nœud situé alors à la position

$$P_k = \theta + k(2\pi/N + \theta' \cdot T) \text{ pour la route vers l'avant}$$

$$\text{et } P_k = \theta - k(2\pi/N - \theta' \cdot T) \text{ pour la route vers l'arrière.}$$

En situation idéale, le nœud mobile final de la chaîne de routage doit être situé sur l'axe origine. Ses coordonnées angulaires sont donc 2π avec la route vers l'avant et 0 avec la route vers l'arrière.

Le nombre théorique de sauts permettant d'atteindre ce nœud vaut k_f pour la route vers l'avant tel que :

$$\theta + k_f(2\pi/N + \theta' \cdot T) = 2\pi$$

$$\text{Soit } k_f = (2\pi - \theta) / (2\pi/N + \theta' \cdot T)$$

Le nombre théorique de sauts permettant d'atteindre ce nœud vaut k_r pour la route vers l'arrière tel que :

$$\theta + k_r(2\pi/N + \theta' \cdot T) = 0$$

$$\text{Soit } k_r = \theta / (2\pi/N + \theta' \cdot T)$$

Le point d'équilibre est obtenu quand $k_r = k_f$ pour un angle θ_0 tel que :

$$\theta_0 = \pi - \theta'NT/2$$

À noter que l'annulation de la vitesse dans cette expression donne bien $\theta_0 = \pi$ utilisé auparavant lorsque la vitesse était négligée.

Algorithme 3 : Algorithme formel de routage

Dans chaque nœud, pour tout paquet à envoyer,

faire

Calculer $\theta_0 = \pi - \theta'NT/2$

Si $\theta < \pi/N - T\theta'/2$ ou $\theta > (\pi(2N-1)/N) - T\theta'/2$, diffuser pour tous

Sinon

Si $\theta < \theta_0$, envoyer à Addest-

Sinon envoyer à Addest+

Fin si

Fin si

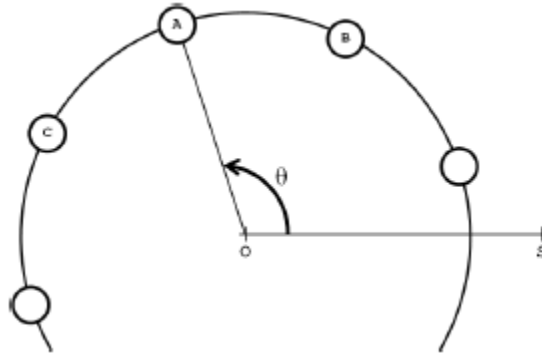


Figure 4-3 Position des nœuds mobiles en coordonnées polaires

4.4 Evaluation des performances

4.4.1 Méthode

Les performances du protocole de routage proposé ont été évaluées par simulation, l'aide du simulateur WSNNet (Chelius et al., 2007). En considérant le scénario de la grande roue de Singapour (Singapore Flyer) déjà utilisé dans le chapitre précédent, ce nouveau simulateur a été choisi pour tester sa facilité d'utilisation et les modèles de protocoles qu'il intègre. En conséquence, 28 nœuds mobiles et un puits statique sont déployés sur une aire de taille 170 mètres par 170 mètres. Le centre du cercle est placé au milieu, ses coordonnées sont donc (85, 85). Le cercle a un rayon de 75 mètres. Le puits est placé aux coordonnées (85, 5), c'est-à-dire à 5 mètres du sol, sur l'armature de la roue. Les nœuds mobiles étant placés dans les nacelles de la grande roue sont distribués régulièrement sur la circonférence. Les coordonnées initiales du nœud 1 sont (85, 10), celles du nœud 2 sont (101,69, 11,88), celles du nœud 3 sont (117,54,

17,43) et ainsi de suite. Les nœuds mobiles se déplacent sur la trajectoire circulaire à une vitesse angulaire de 0,0032 rad/s. C'est une vitesse très faible. Elle peut être négligée dans l'algorithme de routage géographique.

Le modèle radio retenu (cf tableau 4-1) pour les simulations est celui du transcepteur RF CC2420 qui est utilisé dans beaucoup de capteurs sans fil dont les très connus MicaZ, TelosB and Imote2. Il opère dans la bande de fréquence autour de 2.4 GHz en utilisant une modulation O-QPSK et fonctionne à un débit nominal de 250 kbps.

Au niveau MAC, le fameux protocole B-MAC (Polastre et al., 2004) est choisi. L'avantage de B-MAC par rapport au protocoles 802.15.4 est de pouvoir fonctionner en mode écoute à basse puissance (low-power listening – LPL). Dans ce mode, le nœud s'endort périodiquement, se réveille brièvement pour détecter une éventuelle activité sur le canal de réception puis se rendort si aucune activité n'est détectée. B-MAC est configurable avec plusieurs paramètres qui peuvent de plus être changés dynamiquement. L'intervalle de test du canal ou intervalle de réveil fait notamment partie de ces paramètres dynamiques. De plus, le mode LPL peut être activé ou désactivé. Naturellement le délai moyen de transfert d'un paquet à un saut, c'est-à-dire le paramètre T dans l'algorithme de routage proposé, dépend des paramètres de configuration de B-MAC. L'activation du mode LPL a évidemment une influence sur le délai de transfert et celui-ci augmente lorsque l'intervalle de test du canal augmente.

Les paramètres de simulation sont donnés dans le Tableau 4-1. La durée de la simulation est choisie à une valeur de 4000 secondes qui correspond au temps nécessaire à la roue pour faire deux tours. Les simulations ont été réalisées pour les deux modes de fonctionnement du protocole B-MAC c'est-à-dire avec le mode LPL activé d'une part et désactivé d'autre part. Quand le mode LPL est activé, l'intervalle de test du canal est fixé à 10 ms.

Dans le but de pouvoir comparer le protocole de routage proposé avec un protocole existant les simulations ont été faites d'une part avec un routage basique par inondation et d'autre part avec le protocole proposé. Les deux critères habituels de performance sont utilisés : le taux de perte de paquets et le délai d'acheminement de bout en bout.

Modèle radio	Rayon de propagation	20 mètres
	Modulation	O-QPSK
	Débit	250 kbps
	Interférences	Orthogonales
	Antennes	Omnidirectionnelles
Protocoles	Couche MAC	B-MAC
	Couche réseau	Protocole proposé ou inondation
	Couche application	CBR, charge de 20 octets

Tableau 4-1 Paramètres de simulation

4.4.2 Résultats

Les différents résultats sont présentés sous forme synthétique dans les Figure 4-4 et Figure 4-5 et dans les tableaux 4.2 et 4.3. Bien que seuls les critères de performance mesurés soient le taux de perte de paquets et le délai de bout en bout, il est facile de déduire de ces résultats la bande passante disponible. En effet, la méthode de mesure de la bande passante disponible basée sur le *Probe Rate Model* (PRM) (Michaut et al., 2005) considère bien qu'elle est égale au débit de charge du réseau lorsque les pertes de paquets commencent à augmenter.

Délai d'acheminement

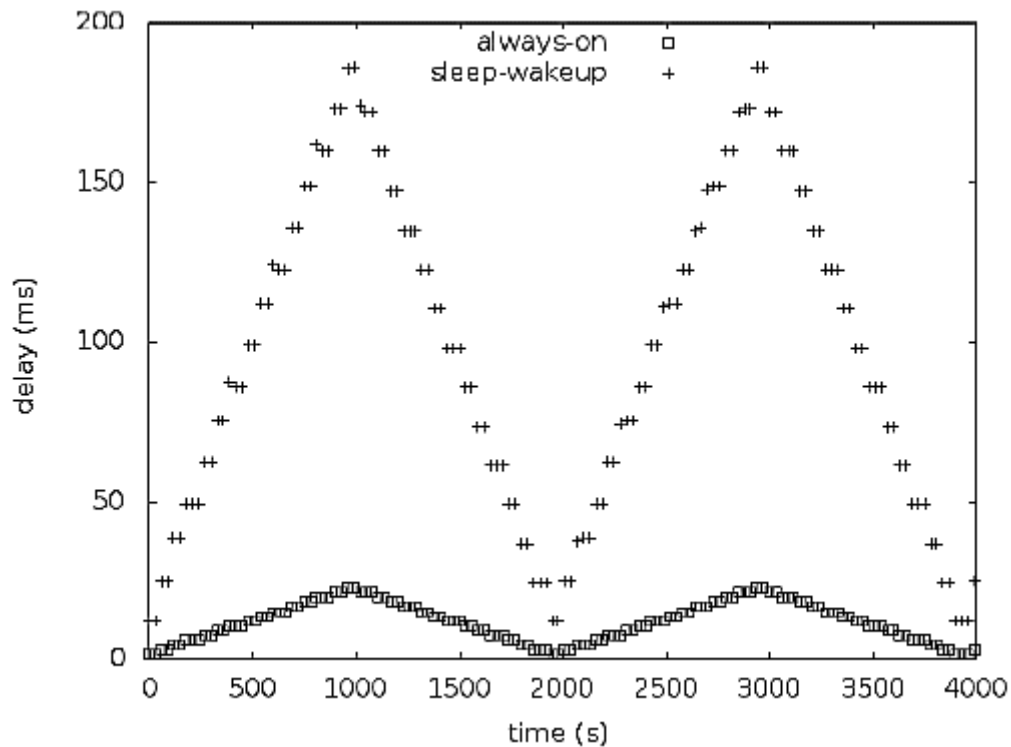


Figure 4-4 . Délai d'acheminement de bout en bout des paquets pour le nœud 1

La Figure 4-4 montre la variation du délai de bout en bout au cours de la rotation de la roue sur deux tours. Ce délai est celui d'un paquet envoyé par le nœud 1 et reçu par le puits. Le nœud 1 est celui situé au plus près du puits au temps $t=0$. Tous les 28 nœuds envoient des paquets durant la simulation avec la même fréquence fixée par le paramétrage de l'application CBR (Constant Bit Rate) utilisée. Pour les résultats montrés sur la figure 4.4, la période de formation des paquets est fixée à 30 secondes de manière à être sûr que le débit soit bien inférieur à la bande passante disponible. Sur cette figure, seuls les paquets envoyés par le nœud 1 sont observés, mais ceux des autres nœuds ont des délais similaires avec un décalage dans le temps dépendant de leur position relative sur la roue. Les deux courbes de la Figure 4-4 montrent que le délai est directement lié au nombre de sauts entre la source et la destination, résultat attendu. Le délai est donc minimal lorsqu'il n'y a qu'un seul saut c'est-à-dire lorsque le capteur mobile est dans le disque de propagation du puits. Ceci se produit lorsque t a une valeur proche de 0 ou de 2000 ou de 4000 secondes. Le délai est maximal lorsque le nœud est situé le plus loin possible du puits, ce qui signifie alors que le paquet fait 15 sauts. L'influence du mode LPL

apparaît bien sur la figure par la différence entre les deux courbes : une avec le mode LPL désactivée pour laquelle les délais restent inférieurs à quelques dizaines de millisecondes et une avec le mode LPL activé avec un intervalle de test de 10 millisecondes pour laquelle les délais atteignent près de 200 millisecondes.

Le Tableau 4-2 Comparaison *des délais de bout en bout* donne une analyse statistique de ce délai d'acheminement de bout en bout avec les valeurs minimales, maximales et les moyennes. Les comparaisons sont faites non seulement entre les modes du protocole B-MAC, mais aussi avec les deux algorithmes de routage, la simple inondation et le routage géographique proposé. Dans tous les cas le délai est un peu plus faible avec le routage par inondation qu'avec le routage proposé. Cela s'explique par le fait que le routage par inondation est plus simple que le routage géographique et qu'il ne demande pas de faire des traitements avant d'émettre un paquet. Mais la différence est faible. D'autre part il faut prendre en considération le fait que le réseau soit peu chargé puisque la période de formation des paquets est de 30 secondes. La différence entre les valeurs obtenues en activant le mode LPL et celles obtenues sans l'activer est en revanche importante. Le délai en mode LPL désactivé reste toujours faible avec une valeur maximale de 23 ms environ.

Protocoles B-MAC et routage	Valeur minimale (ms)	Valeur moyenne (ms)	Valeur maximale (ms)
LPL désactivé et notre routage géographique	1,53	12,03	23,04
LPL désactivé et inondation	1,41	10,03	19,71
LPL activé et notre routage géographique	12,29	97,02	186,04
LPL activé et inondation	12,16	87,40	170,24

Tableau 4-2 Comparaison des délais de bout en bout

Taux de perte de paquets

L'application CBR qui génère les unités de données à l'origine de la création des parquets fonctionne avec une période ajustable. Puisque nous conservons une taille fixe des unités de données à 20 octets, la variation de la charge du réseau est obtenue par variation de la période de l'application CBR. Les simulations réalisées visent à mesurer le taux de perte des paquets en fonction de la période de l'application CBR. Elles ont été réalisées avec les deux protocoles de routage : le routage par inondation et le routage géographique proposé. Dans les deux cas, le mode LPL du protocole B-MAC est activé avec une période de test de 10 ms. Les résultats sont présentés sous forme de courbes sur la Figure 4-5. Ces résultats montrent que les deux protocoles sont efficaces tant que la période de génération des paquets est supérieure à 10 s puisque le taux de perte de paquets est quasi nul. Il est en fait inférieur à 1%. Mais quand la période de génération des parquets est ajustée à une valeur en dessous de 10 s, le taux de perte de parquets augmente brutalement dans le cas de l'utilisation du routage par inondation. Lorsque le routage géographique proposé est utilisé, le taux de perte de paquets reste insignifiant en diminuant la période de génération des paquets jusqu'à une valeur de 2 s. **Ces résultats montrent que le protocole de routage proposé permet d'abaisser significativement le seuil de la valeur de la période d'échantillonnage des mesures par**

rapport à l'usage d'un routage basique par inondation. Des phénomènes à la dynamique plus rapide peuvent donc être surveillés.

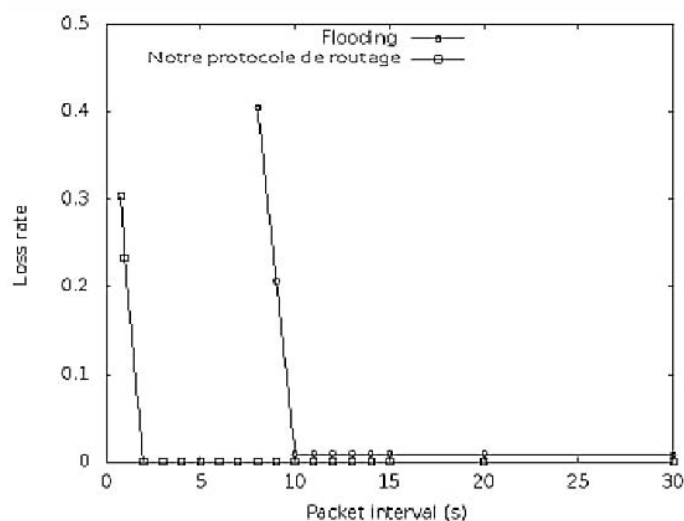


Figure 4-5 Taux de perte de paquets en fonction de leur période de génération

Il est important de connaître la plus petite période d'échantillonnage que cette architecture de réseaux de capteurs permet de supporter. En effet cette valeur donne la plus grande dynamique observable par le système de surveillance dans lequel cette architecture s'insère. Rappelons que cette architecture comporte 28 nœuds qui génèrent tous des paquets avec la même période.

Des simulations ont été réalisées avec quatre réglages du protocole B-MAC : mode LPL désactivé donc radio toujours active, mode LPL avec intervalle de test de canal égal à 10 ms, puis 20 ms puis 50 ms. Pour chacun de ces cas, des essais ont été fait en modifiant la période d'échantillonnage et en mesurant le taux de perte des paquets. Le protocole géographique proposé est toujours utilisé. La période a été abaissée tant que le taux de perte restait inférieur à 1%. Les limites basses des périodes d'échantillonnage avec un bon fonctionnement, c'est-à-dire un taux de perte de paquets inférieur à 1%, sont données dans le Tableau 4-3. La limite basse absolue est donc de 175 ms, elle est obtenue naturellement avec le mode LPL désactivé.

Ces expérimentations confirment que le mode LPL n'est pas adéquat pour des faibles périodes d'échantillonnage.

Réglage de B-MAC	Période minimale d'échantillonnage
LPL désactivé	175 ms
LPL activé, période de test de 10 ms	1,350 s
LPL activé, période de test de 20 ms	2,450 s
LPL activé, période de test de 50 ms	5,850 s

Tableau 4-3 Période minimale d'échantillonnage pour différents réglages de B-MAC

4.5 Conclusion

La topologie du réseau de capteurs avec relais embarqués a été étudiée en détail. Un protocole de routage adapté a été développé en s'appuyant sur le principe du routage géographique. Ce protocole utilise deux paramètres liés au mouvement du mobile : sa position et sa vitesse. Le paramètre vitesse peut être négligé dans le cas général où elle est faible en regard de la vitesse de transmission des paquets. La localisation a été considérée comme existante, mais aucune solution particulière n'a été privilégiée.

Les tests de performance ont été réalisés par simulation en s'appuyant sur un déploiement virtuel sur la grande roue de Singapour. Le protocole B-MAC a été utilisé pour mettre en évidence l'influence de périodes de sommeil sur les performances. Cette influence est importante et l'utilisation de telles périodes n'est possible que pour la surveillance de phénomènes peu dynamiques. En mode sans sommeil, équivalent au protocole CSMA/CA classique, les résultats expérimentaux montrent que la période minimale d'acquisition de données sur les 28 nacelles simultanément est suffisamment faible pour surveiller des phénomènes assez dynamiques. Le protocole de routage géographique permet d'abaisser cette valeur par rapport à l'utilisation d'un routage basique par inondation. Cette période minimale de bon fonctionnement, qualification donnée au réseau pour un taux de perte de paquet inférieur à 1%, est nettement meilleure que celle obtenue avec une topologie basée sur des relais fixes étudiée dans le chapitre précédent. De plus, cette solution n'utilise aucun nœud supplémentaire, le relaiage des paquets étant assuré par les nœuds capteurs eux-mêmes. Le délai maximal d'acheminement est également très inférieur et il est totalement compatible avec une surveillance en ligne. En conclusion cette solution est très bien adaptée pour des systèmes de type TC-SD (Trajectoire Circulaire – Système Distribué) ou TC-SM (trajectoire Circulaire-Système Monolithique), car elle non seulement facile et économique à déployer, mais elle délivre aussi une bonne qualité de service. Elle devrait être performante pour tous les systèmes distribués pour lesquels la distance entre les modules est inférieure à la portée radio des nœuds, quelque soit la trajectoire. La tenue au facteur d'échelle doit toutefois être étudiée, par exemple pour des systèmes comme de grands télésièges.

Une amélioration possible des performances pourrait être obtenue par agrégation de paquets. Avec cette architecture et lorsque tous les capteurs sont actifs, une agrégation successive des paquets traversant les nœuds serait certainement efficace. En supposant une synchronisation des mesures sur tous les nœuds, le nœud le plus éloigné du nœud relais interface prendrait l'initiative de l'envoi d'un paquet avec ses données au nœud voisin dans la direction du nœud relais par la route la plus courte. Ce nœud voisin ajouterait ses données au paquet reçu avant de l'envoyer à son voisin toujours dans la direction du relais interface, et ainsi de suite. Compte tenu de la taille maximale de la trame du protocole 802.15.4, c'est-à-dire 127 octets, de la taille de chaque donnée fixée dans le scénario utilisé à 20 octets, de l'entête pour l'adressage et de la terminaison pour la clé de vérification, 6 paquets successifs peuvent être agrégés. Ce procédé allégerait le nombre de paquets à proximité du puits, le goulot d'étranglement du réseau. Il compliquerait significativement le protocole de formation et de transmission des paquets puisque celui-ci doit tenir compte de la position instantanée du nœud. Le test d'un tel procédé fait partie des perspectives du travail après cette thèse.

Chapitre 5 : Expérimentation sur un site industriel

5.1	Introduction	88
5.2	La chaine de peinture	88
5.3	Topologie déployée	89
5.4	Méthodologie de localisation à base du RSSI	90
5.4.1	Le mobile se prend en charge pour se localiser.....	90
5.4.2	Le calcul de la position se fait sur un serveur par réseau de neurones artificiel 92	
5.4.2.1	Introduction	92
5.4.2.2	Le réseau de neurones	93
5.4.2.3	La phase d'apprentissage	94
5.4.2.4	Mise en œuvre	97
5.4.2.4.1	Formation de la carte d'empreintes.....	97
5.4.2.4.2	Paramétrage du réseau de neurones	98
5.5	Expérience et résultats.....	100
5.5.1	Résultats des deux approches : triangulation et réseaux de neurone.....	100
5.5.2	Projection sur la trajectoire	102
5.6	Conclusion.....	105

5.1 Introduction

Dans le but de vérifier nos hypothèses et nos résultats, théoriques et obtenus par simulation, j'ai cherché à réaliser une expérimentation en vraie grandeur sur un site industriel. J'ai obtenu l'autorisation de réaliser des expérimentations sur une chaîne de peinture de l'entreprise Ingelec⁴ située dans la capitale économique du Maroc, Casablanca. Ingelec est aujourd'hui le leader incontesté de l'appareillage électrique basse tension au Maroc et en Afrique francophone.

Dans ce qu'on a vu jusqu'à maintenant, on remarque que la localisation du mobile est une fonction primordiale tant pour le fonctionnement du réseau que pour caractériser les données captées, c'est pour cette raison que nous allons focaliser nos expériences sur la localisation, afin de déterminer dans un cas réel la meilleure approche à adopter pour un bon fonctionnement du réseau. L'instrumentation sera d'abord présentée avec la topologie retenue pour le réseau de capteurs. Puis les mesures seront présentées ainsi que leur traitement. Les résultats de localisation obtenus sont ensuite discutés.

5.2 La chaîne de peinture

La machine cible est une chaîne de peinture construite autour d'un convoyeur pas à pas représenté sur la Figure 5-1. Nous avons profité de l'arrêt de la machine pour maintenance préventive et surtout de l'arrêt du tunnel de cuisson pour faire des expériences. À noter qu'il faudrait trouver une solution de protection thermique des nœuds capteurs mobiles pour pouvoir doter ce type de machine du système de mesure proposé.

La machine couvre un espace de 5000m² (D : 100m et E : 50m). La vitesse du convoyeur peut atteindre 5m/s. D'après la notice technique de la machine, la vitesse moyenne nominale de fonctionnement est de 1,2m/min. La machine fonctionne soit en mode continu soit en mode pas à pas, ainsi le pas est réglable en fonction de la pièce à traiter, Nous allons utiliser cette vitesse pour étudier les performances des deux approches de localisation proposées dans le cadre de notre thèse.

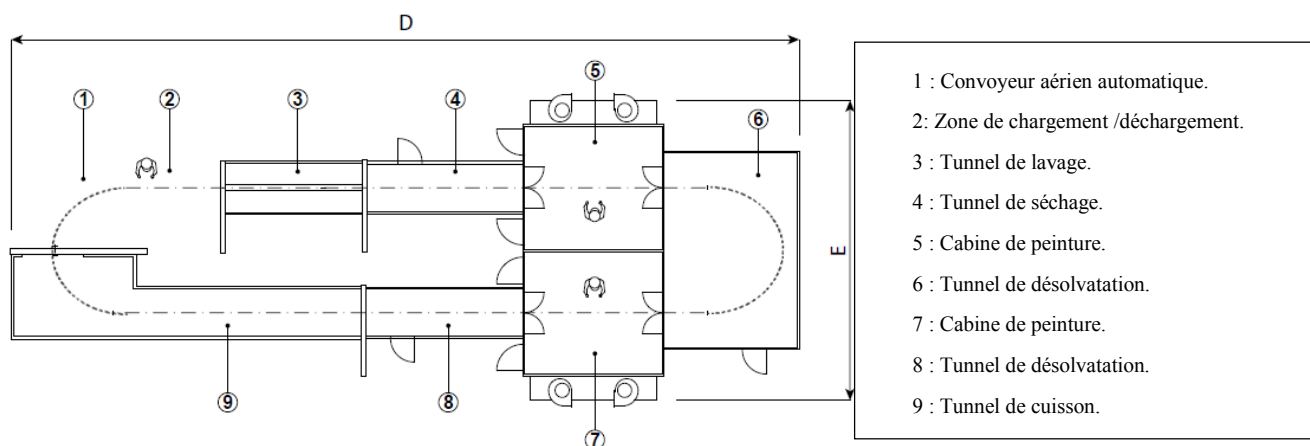


Figure 5-1 Chaîne de peinture avec convoyeur

⁴ <http://www.ingelec.com>

À noter que sur le pupitre de la machine on peut connaître la position d'une pièce au niveau du convoyeur, le programme de l'automate qui gère la machine utilise les informations issues d'un encodeur pour localiser l'objet et pour mesurer et fixer la valeur du pas. Nous allons exploiter la position indiquée par l'automate pour les deux approches traitées dans ce chapitre.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons expliquer la démarche suivie pour déployer les nœuds relais, dont le but est d'assurer la couverture totale de la trajectoire et garantir une meilleure localisation.

5.3 Topologie déployée

Notre but étant d'utiliser une localisation à partir du signal émis par des ancres, nous avons choisi une topologie du réseau de capteurs mettant en œuvre des relais fixes, telle que décrite au chapitre 3. Mais le nombre de nœuds relais fixes nécessaires au bon fonctionnement de la communication dans le réseau de capteur est faible, ici un seul nœud suffit en plaçant correctement le puits. Comme indiqué dans le chapitre 2, il faut au moins trois ancres pour localiser le mobile à partir de la mesure des signaux qu'elles émettent. À noter que deux ancres sont suffisantes si on exploite notre connaissance de la trajectoire. Cette nécessité a conduit à placer 9 nœuds fixes, dont le puits, comme le montre la figure 5.2, en utilisant un rayon de communication de 50 m.

Les premiers nœuds fixes placés sont ceux qui jouent le rôle de puits et de relais. Le puits est le nœud identifié par le numéro 0. Deux nœuds relais sont nécessaires pour la communication, ils sont identifiés par les numéros 1 et 2.

Des ancres doivent être déployées tel que le mobile soit toujours à l'intérieur du rayon de communication de trois d'entre elles au minimum. Les 6 nœuds numérotés de 3 à 8 jouent ce rôle. Ils permettent au nœud mobile d'alimenter la base de données de la carte d'empreintes.

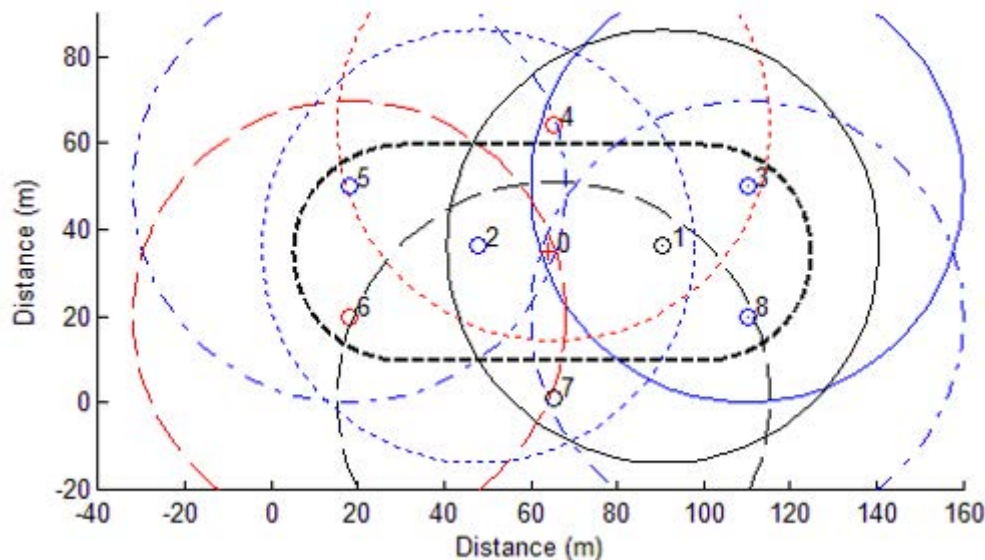


Figure 5-2 la position des nœuds relais et ancres

5.4 Méthodologie de localisation à base du RSSI

La localisation à l'aide de mesures du RSSI est comme indiqué dans l'état de l'art une méthode pratique et peu coûteuse à défaut d'être très précise. C'est celle que nous avons retenue pour notre expérimentation. Un seul nœud mobile est utilisé, ce qui évite une partie des problèmes de collision de messages utiles à la localisation. Pour rappel, la localisation à l'aide du RSSI peut être réalisée directement sur le nœud mobile ou être sous traitée à un serveur qui lui enverra en retour le résultat. Nous avons cherché à comparer les deux solutions.

5.4.1 Le mobile se prend en charge pour se localiser

Dans ce cas, le nœud mobile calcule directement sa position avec la technique de triangulation, à partir des mesures RSSI. Il est en effet impossible d'installer sur le nœud le programme qui traite une base de données de mesures préalables des empreintes qui sera aussi greffée sur la mémoire du nœud. Ceci en raison d'une part de la fréquence de fonctionnement du microcontrôleur de type Atmel Avr Atmega 128L⁵, qu'est seulement de 7.4Mhz sur nos nœuds de type MicaZ et qui induit donc de longs temps d'exécution du programme. D'autre part en raison de la taille mémoire disponible, les nœuds déployés dans nos expériences ont une capacité de stockage très limitée (128 Ko EEPROM et 4 Ko de RAM). L'empreinte se compose de 4 octets pour les coordonnées (2 coordonnées fois 2 octets par coordonnée) et 16 octets pour la mesure RSSI (8 ancres fois 2 octets pour le RSSI de chaque ancre), soit un total de 20 octets par empreinte. Le système d'exploitation et le code du programme ont une taille de 70 koctets, 32 koctets pour le système d'exploitation, laissant 26 koctets de mémoire pour stocker une base de données de signatures de référence de taille 1300 signatures, ce qui est devrait être juste suffisant pour notre cas puisque nous avons besoin de 1195 signatures. Mais ce n'est pas le cas général et le problème de temps d'exécution reste entier.

Le nœud mobile, à chaque arrêt de la chaîne détecté par le biais de l'accéléromètre intégré au niveau de notre nœud, envoie un paquet HELLO en broadcast. Le paquet est constitué d'un tuple de la forme $\langle SourceID, powerTx \rangle$, *SourceID* est l'identifiant du nœud mobile, et *powerTx* est le niveau de puissance de transmission utilisé pour diffuser le message. Le nœud mobile écoute pendant une certaine période de temps pour acquérir les réponses des ancres qui sont sous la forme $\langle SourceID, x, y, d \rangle$, *SourceID* est l'identifiant de l'ancre, *x* et *y* les coordonnées de l'ancre, et *d* la distance qui sépare l'ancre et le mobile. Cette distance est calculée par l'ancre sur la trame HELLO reçue afin d'alléger traitement sur mobile, en utilisant la formule (5-1).

$$P_R = P_T - 10\eta \log(D) + X_\sigma \quad (5-1)$$

Avec P_T la puissance du signal transmise en fonction du gain de l'antenne des nœuds, η est la constante d'atténuation (par exemple, 2 ou 4) dépend du milieu de déploiement, et X_σ le facteur d'incertitude due aux trajets multiples et à l'ombrage. Depuis la puissance d'émission du paquet, la puissance P_T est fixée et connue par les récepteurs, la réception de la force du signal peut être utilisée pour estimer la distance avec une erreur proportionnelle au facteur d'incertitude X_σ , et l'erreur de mesure RSSI.

⁵[http:// www.atmel.com/Images/doc2467.pdf](http://www.atmel.com/Images/doc2467.pdf)

On remarque que la dernière partie doit inclure aussi les autres mécanismes de propagation tel que la réflexion, la réfraction, la diffusion, etc. le paramètre X_σ a été calibré pratiquement.

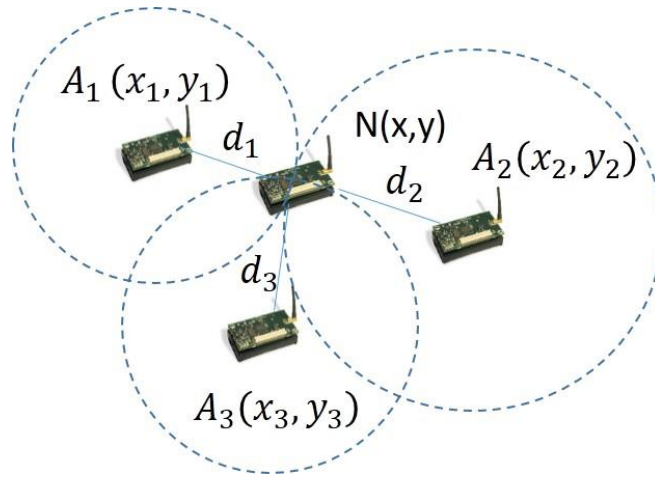


Figure 5-3 Triangulation pour un nœud : Zone d'intersection

Le nœud mobile dispose ainsi des coordonnées des ancres qui ont donné une suite à sa requête et (5-2) permet de mettre en relation les différents paramètres mesurés.

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

Pour calculer l'intersection des trois cercles, on doit résoudre le système (5-2) de cette façon : soustraire la troisième équation à la deuxième et soustraire la troisième équation à la première ce qui donne :

$$\begin{aligned}(x - x_1)^2 + (x - x_3)^2 + (y - y_1)^2 + (y - y_3)^2 &= d_1^2 - d_3^2 \\(x - x_2)^2 + (x - x_3)^2 + (y - y_2)^2 + (y - y_3)^2 &= d_2^2 - d_3^2\end{aligned}\tag{5-3}$$

On développant le système (5-3) on trouve alors :

$$\begin{aligned}2x(x_3 - x_1) + 2y(y_3 - y_1) &= d_1^2 - d_3^2 + x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2 \\2x(x_3 - x_2) + 2y(y_3 - y_2) &= d_2^2 - d_3^2 + x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2\end{aligned}\tag{5-4}$$

On a donc un système de deux équations à deux inconnues. L'équation permet au mobile d'estimer sa position (x, y)

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

Ensuite, nous obtenons un système d'équation sous la forme $Ax = b$ avec :

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \\ 2(x_3 - x_2) & 2(y_3 - y_2) \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

$$B = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ (d_2^2 - d_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

Dans le cas réel les mesures sont affectées par des erreurs et les cercles se coupent à plus d'un point, ces points délimitent la zone de solution. De ce fait nous ne pouvons pas calculer une solution exacte du système $Ax = B$. La solution la plus proche au sens des moindres carrés de la solution exacte est obtenue en minimisant : $(Ax - B)^T(Ax - B)$ (Shen et al., 2011). La précision de cette solution est donnée par le résiduel :

$$Res = \frac{\sum_{i=1}^3 \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - d_i}{3} \quad (5-8)$$

Où (x, y) est la position estimée du nœud mobile.

La méthode est centrée mobile c'est-à-dire que le nœud mobile peut estimer sa position lui-même en se basant sur les mesures de la puissance de signal. Le paragraphe suivant abordera la solution lourde basée sur l'apprentissage par le serveur.

5.4.2 Le calcul de la position se fait sur un serveur par réseau de neurones artificiel

5.4.2.1 Introduction

Le nœud mobile, qui a besoin d'être localisé par le serveur, reçoit la réponse des ancres suite à l'envoi de son paquet HELLO, mesure RSSI correspondant et envoie au serveur via le sink le vecteur des mesures $\langle \text{RSSI1}, \text{RSSI2}, \dots, \text{RSS8} \rangle$. Après traitement, le serveur renvoie la position vers le nœud mobile. L'avantage de cette configuration réside dans la possibilité d'exploiter la puissance de calcul du serveur ainsi que ses ressources en mémoire. Il faut en principe bien dimensionner la fréquence des échanges entre le nœud mobile et le serveur. En effet, l'envoi de grandes quantités de données augmente la consommation de l'énergie au niveau du nœud

mobile. Mais un envoi insuffisant ne permet pas une localisation correcte. Il faut notamment ne pas envoyer plusieurs fois les mêmes mesures. Le dimensionnement de ce compromis est un problème, qu'on ne va pas le traiter dans ce chapitre.

Au niveau du serveur nous allons utiliser l'approche basée sur les Réseaux de Neurones Artificiel ou RNA décrite dans l'état de l'art paragraphe 2.6.5.4. Ils sont largement exploités dans les domaines de classification et de reconnaissance de formes. Combinés aux chaînes de Markov, ces réseaux sont capables de faire correspondre un ensemble donné d'entrées avec un ensemble de sorties cibles spécifiées. Un RNA utilise l'apprentissage supervisé, c'est pourquoi la première opération est de réaliser une carte d'empreintes.

5.4.2.2 Le réseau de neurones

Un perceptron multicouche (MLP) est un type particulier de réseaux de neurones dont l'architecture est constituée de couches : une couche d'entrée, une couche de sortie et une ou plusieurs couches intermédiaires, dites couches cachées. Dans les réseaux de neurones pleinement connectés, chaque neurone est connecté à chaque neurone de la couche suivante. Le rôle de la couche d'entrée est de distribuer les empreintes d'entrée aux couches suivantes. Les neurones d'entrée ont une fonction d'activation linéaire sans seuils (biais).

Chaque nœud de la couche cachée et chaque nœud de sortie ont des seuils qui leur sont associés, en plus des coefficients de pondération.

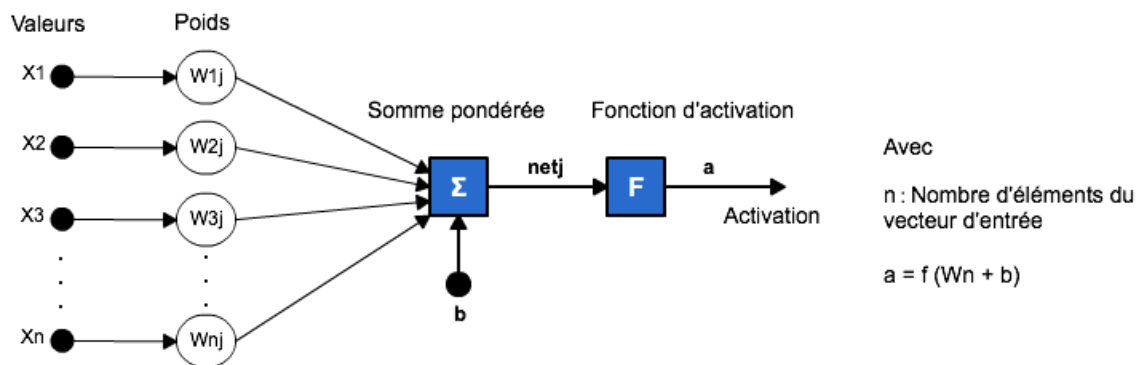


Figure 5-4 Exemple de réseaux de neurone

Les neurones cachés ont une fonction d'activation non linéaire, qui donne aux réseaux de neurones la capacité d'imiter les propriétés de correspondance non linéaire. Elle rend le réseau approprié pour de nombreuses applications, sans les limitations des réseaux linéaires purs. L'empreinte digitale d'entrée, multipliée par un poids supplémentaire à un seuil, est passée à travers une fonction d'activation qui peuvent être linéaire ou non linéaire (unités cachées). En outre, il est prouvé (théorème de Kolmogorov)(Kurková, 1992) qu'un réseau neuronal à deux couches perceptron avec une fonction non-linéaire peut générer en sortie une fonction avec l'approximation désirée. Un exemple de réseau avec une seule couche cachée est représenté sur la Figure 5-5.

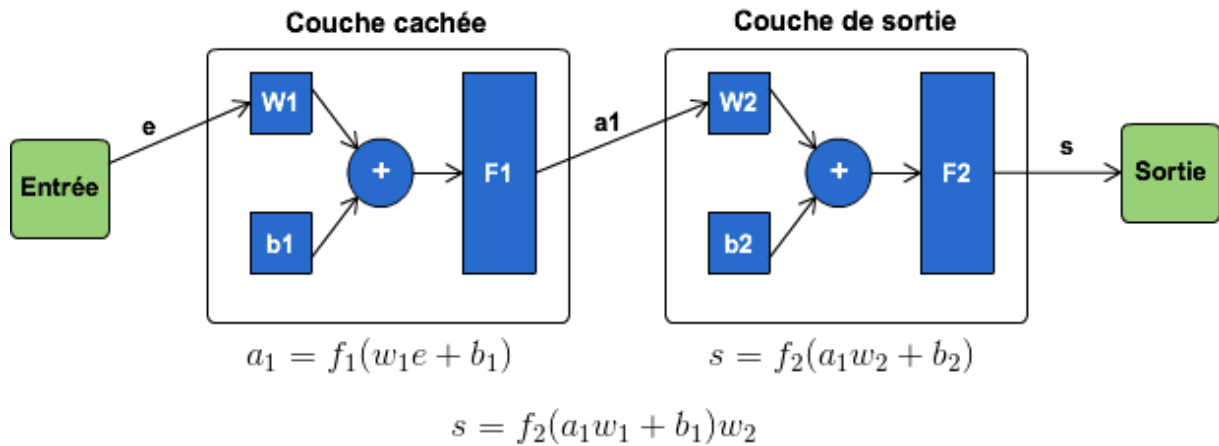


Figure 5-5 Réseaux de neurones à une seule couche cachée, F_i est la fonction d'activation, W_i les poids et b_i le bias

5.4.2.3 La phase d'apprentissage

Au début, les poids initiaux W_i sont choisis au hasard, puis ils sont modifiés par le processus d'apprentissage. À chaque pas d'apprentissage, l'erreur en sortie est calculée comme la différence entre la valeur recherchée et la sortie du réseau. Pour ce faire, trois méthodes d'apprentissage différentes peuvent être appliquées : l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé (ou apprentissage adaptatif) et l'apprentissage par renforcement.

La phase d'apprentissage du réseau consiste à modifier, à chaque pas, les poids W_i et les biais b_i afin de minimiser la somme des carrés des erreurs en sortie en utilisant la loi de Widrow-Hoff. Il existe plusieurs algorithmes qui permettent de calculer les poids et les biais, le but est donc de trouver un algorithme qui a une bonne convergence globale. On commence par l'algorithme du gradient ou de la plus grande pente, aussi connu sous le nom de l'algorithme de la rétro-propagation de l'erreur (EBP : Error Back Propagation)(Hagan et al., 1994; Rumelhart et al., 1986).

L'EBP est un algorithme d'apprentissage supervisé basé sur deux étapes principales. La première consiste à propager tous les signaux d'entrée dans le réseau et à calculer les résultats de la couche de sortie. La deuxième étape consiste à calculer les erreurs de gradients et à propager à nouveau afin de mettre à jour les poids synaptiques de tous les neurones qui ont participé à l'erreur observée. Pour cela, une règle de mise à jour basée sur la technique de la descente de gradient est utilisée.

La taille de la couche d'entrée en termes de nombre de neurones est fixée par le vecteur de l'espace de données P . En effet, ce vecteur est présenté donnée d'entrée sur le réseau. La taille de la couche de sortie est en fonction du nombre de classes c . Dans le cas de $c = 2$, un seul neurone binaire est suffisant, car chacune de ses sorties possibles, 0 ou 1, peut être associé à l'une des deux classes. Le nombre et la taille des couches cachées dépendent de l'application. Dans notre cas, une seule couche cachée est suffisante et la taille de cette couche a été déterminée de manière heuristique (voir la sous-section a).

L'algorithme de rétro-propagation (BP) peut être décrit comme suit:

La base de données d'apprentissage $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ avec n représente le nombre total disponible des enregistrements stocker au niveau de la base, dans l'exemple et x le vecteur d'objet associé à i^e rang, Ainsi, l'erreur locale observée à la sortie de la k^e neurone est donné par la fonction (5-9) :

$$e(t) = d_k(t) - y_k(t) \quad (5-9)$$

$d_k(t)$ et $y_k(t)$ désignent, respectivement la sortie souhaitée et la sortie observée du neurone k .

Cette erreur représente la contribution du neurone k pour le carré global de l'erreur définie par (5-10) :

$$E(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^c (d_k(t) - y_k(t))^2 \quad (5-10)$$

L'algorithme BP est une procédure itérative visant à minimiser l'erreur donné par l'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en utilisant la technique de descente de gradient. En termes plus formels, le fonctionnement de cet algorithme est décrit dessous :

Algorithme 4: Algorithme de rétro-propagation

```
//xi représente l'enregistrement d'une empreinte à la position i :  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \subset \mathcal{R}^p$ 
// L'ensemble des poids synaptiques  $p$  est initialisée par des petites valeurs aléatoires Tel que  $W_i \in [-0,5, 0,5]$ 

// Organiser les données d'apprentissage aléatoire,  $i := 1$ 
// N : le nombre maximum d'itération
//Avec  $y_j(n)$  : représente la sortie du nœud  $j$  à l'itération  $n$ ,

While ( $n < N$ )
{
//Calculer sur la couche de sortie  $y_j(n)$  .

$$y_j(n) = \frac{1}{1 + e^{(-b + \sum_{k=1}^n w_k \times x_k)}}$$

// Calculer les deltas de la couche précédente par propagation arrière de l'erreur
// Ajuster les poids de chaque neurone  $j$  en utilisant la règle delta
Tel que  $w_{ji}(n) = w_{ji}(n - 1) + \eta \times \delta_i(n) \times y_i(n)$ 
```

Avec $\delta_j(n) = y_j(n) \times (1 - y_j(n)) \times e_j(n)$

// Tel que $0 < \eta < 1$ est un taux d'apprentissage fixe

$$\delta_j(n) = y_j(n) \times (1 - y_j(n)) \times \sum_{k \in \text{couche suivante}} \delta_k(n) \times w_{kj}(n)$$

n=n+1

} **Until** // répéter pour l'entrée suivante, jusqu'à ce que l'erreur en sortie soit inférieure à la limite fixée ou le nombre maximum d'itération soit atteint

L'algorithme de Levenberg-Marquardt (Levenberg, 1944), (Marquardt, 1963) est une technique itérative, qui localise le minimum d'une fonction exprimant la somme des carrés des fonctions numériques non linéaires. À chaque fois que la solution calculer est loin de celle trouver précédemment, l'algorithme utilise une méthode de descente de gradient plus raide: lent (Yu et al., 2011), mais en garantissant la convergence. D'autre part, si la solution calculée est proche de la précédente, l'algorithme adopte la méthode de Gauss-Newton (Hagan et Menhaj, 1994). Nous donnons ensuite une brève description de l'algorithme de la descente de gradient.

- Algorithme de descente de gradient :

La descente de gradient est un algorithme d'optimisation qui permet de trouver un minimum local d'une fonction, dont le principe est de partir d'un point aléatoire puis de se déplacer dans la direction de la plus forte pente. En appliquant un certain nombre d'itérations, l'algorithme converge vers une solution qui est un minimum local de $F(x)$ cf Figure (5-6). La descente de gradient est basée sur le constat suivant : si la fonction réelle $F(x)$ est définie et dérivable dans un voisinage d'un point q , alors $F(x)$ diminue plus rapidement. En effet le gradient donne une direction vers laquelle se déplacer pour trouver le minimum cf figure (5-6), c'est une autre manière de diminuer le nombre d'itérations, mais ne donne pas le pas. Ce dernier est un coefficient fixe dans le cas de la descente de gradient classique. Il peut varier à chaque itération dans la variante adaptative, mais la dérivée seconde de $F(x)$ est liée au rayon de courbure de la fonction, et permet donc de déterminer ce pas de manière plus fine.

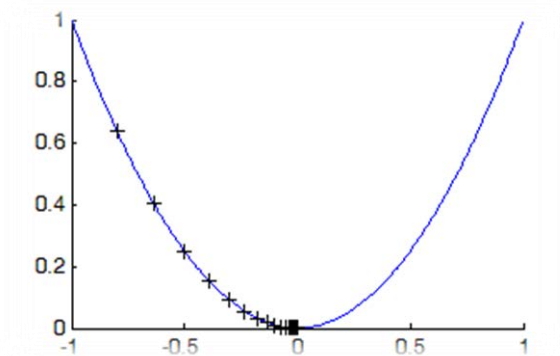


Figure 5-6 exemple du principe de la descente de gradient : cas d'une fonction à une variable

5.4.2.4 Mise en œuvre

5.4.2.4.1 Formation de la carte d'empreintes

Cette phase a été la première que nous ayons réalisée. Elle avait pour but que le nœud mobile envoie au serveur les puissances des signaux reçus associées à la position collectée automatiquement. Le serveur de localisation accumule tous les vecteurs de puissance pour la phase d'apprentissage. La machine a été configurée pour qu'elle fonctionne avec le pas de 25cm sur toute la trajectoire (un tour du mobile) ce qui donne 1195 pas (vecteurs de puissance), ce pas est utilisé seulement dans la phase de formation de la carte des empreintes. Pour les tests d'autres pas seront utilisés.

La machine utilise déjà des capteurs sans fil. Pour éviter toute interférence, il est donc important de ne pas activer sur notre réseau de capteurs les mêmes fréquences que celles déjà exploitées. Ne connaissant pas ces fréquences, nous les avons cherchées à l'aide d'un mesureur de champ électromagnétique.

Nous avons collecté toutes les coordonnées (x, y) de 1195 positions, afin que le serveur associe les mesures de RSSI envoyées par le mobile pour réaliser une carte des empreintes

Une fois que les capteurs ont été programmés pour fonctionner sur un canal libre, la collecte des informations a pu démarrer.

Une fois que le mobile détecte l'arrêt du convoyeur par le biais de l'accéléromètre (figure 5-7), il envoie le paquet HELLO, chaque ancre qui reçoit ce paquet envoie 10 réponses au nœud mobile. Le nœud mobile fait la moyenne des ces mesures de RSSI de chaque ancre, effectuées pour chacune des positions correspondant au nombre de pas de la machine par cycle. Le cycle représente le retour du mobile à l'emplacement initial. Pour limiter l'effet du bruit dû aux activités humaines et du bruit blanc, les valeurs de la moyenne seront envoyées vers l'ordinateur, sous forme d'un vecteur $P = (RSS_1, RSS_2, \dots, RSS_8)$, où RSS_i est la moyenne de la puissance du signal de la $i^{\text{ème}}$ ancre. Dans le cas où $RSS_i = 0$ l'ancre en question est hors de portée du nœud mobile. Le vecteur est envoyé au serveur afin d'associer les coordonnées (x, y) correspondant.

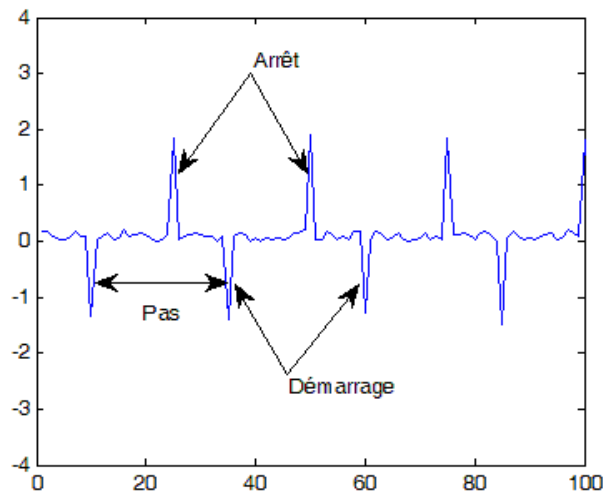


Figure 5-7 Le graphe de l'accéléromètre

L'expérience a duré pendant plus de 6 heures et était cyclique, 1195 mesures ont été collectées comme données d'apprentissage, ainsi on a construit une base de données étiquetées qui va nous servir pour la phase de la localisation.

5.4.2.4.2 Paramétrage du réseau de neurones

Choix du nombre de neurones, couches cachées, nombre de neurones et fonctions de transfert :

Afin de concevoir un réseau de neurones approprié pour le positionnement de capteurs sans fil, nous devons d'abord déterminer ses paramètres. Nous choisissons une seule couche cachée dans l'objectif de ne pas augmenter inutilement la complexité du réseau de neurones. Nous allons essayer de 5 puis 10 et jusqu'à 100 neurones en couche cachée pour faire des tests de performances. Deux fonctions de transfert seront aussi utilisées : une fonction linéaire (Figure 5-8) et une fonction sigmoïde (Figure 5-9).

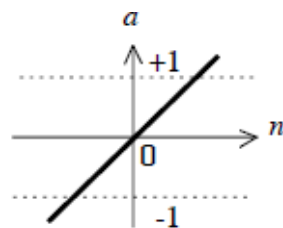


Figure 5-8 fonction linéaire

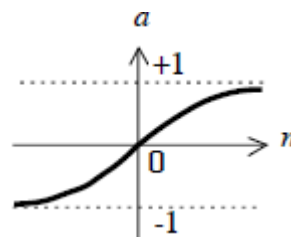


Figure 5-9 fonction sigmoïde

Nous avons besoin d'effectuer au total, en considérant tous les couples possibles, $2^2 = 4$ possibilités de configurations pour les deux couches de neurones et les 2 fonctions adoptées (Tableau 5-1).

	La fonction F ₁	La fonction F ₂
Cas 1	linéaire	Linéaire
Cas 2	Sigmoïde	linéaire
Cas 3	Linéaire	Sigmoïde
Cas 4	Sigmoïde	Sigmoïde

Tableau 5-1 Différentes possibilités d'assemblage de fonctions

Nous allons maintenant vérifier si un seul réseau est suffisant pour prédire toutes les positions du nœud mobile. Pour ce faire, nous allons utiliser les 1000 vecteurs d'entrées (chacun d'eux possédant 8 valeurs) pour la phase d'apprentissage. L'apprentissage adopté est celui de Levenberg-Marquardt (Levenberg, 1944), qui permet une convergence plus rapide par la prise en compte des dérivées du second ordre. Après quelques tests, nous choisissons le nombre d'itérations à 20000. L'erreur est fixée à 0,0004. Notons également que l'apprentissage s'effectue dans un premier temps sans validation croisée pour éviter que celle-ci ne vienne interrompre l'apprentissage à cause d'un minimum local (variation positive de l'erreur). La validation croisée est ensuite mise en œuvre, lorsque le réseau est proche de l'optimum.

L'apprentissage terminé, le test des réseaux et du perceptron se fait sur 195 vecteurs différents de ceux utilisés pour l'entraînement et la validation croisée.

Pour l'ensemble des essais, l'écart type E.T et la valeur moyenne M.T sont calculés de manière à choisir le nombre de neurones qui permet une meilleure précision. Une diminution de l'écart-type signifierait que la prédiction a été efficace. Les résultats relatifs aux 4 configurations de réseaux pour les différents nombre de neurones sont repris dans le Tableau 5-2.

	Cas1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	E.T	V.M	E.T	V.M	E.T	V.M	E.T	V.M
5 neurones	0,0229	1,1077	0,0017	0,0711	0,0034	0,1401	0,0015	0,0595
10 neurones	0,0052	0,4004	0,0013	0,0545	0,0033	0,1388	0,0015	0,0593
15 neurones	0,0280	1,2651	0,0011	0,0441	0,0033	0,1395	0,0015	0,0597
20 neurones	0,0170	0,7999	0,0013	0,0530	0,0034	0,1398	0,0015	0,0594
25 neurones	0,0137	0,6572	0,0013	0,0516	0,0225	0,9802	0,0015	0,0593
30 neurones	0,0100	0,5079	0,0014	0,0555	0,0192	0,8805	0,0015	0,0595
40 neurones	0,0083	0,6020	0,0017	0,0714	0,0033	0,1381	0,0015	0,0597
45 neurones	0,0308	1,2050	0,0023	0,0926	0,0221	0,9646	0,0015	0,0596
50 neurones	0,0174	0,8146	0,0033	0,1329	0,0033	0,1378	0,0015	0,0595
100 neurones	0,0903	2,5417	0,0886	2,5287	0,0875	2,5079	0,0858	2,5177

Tableau 5-2 Ecart type et la valeur moyenne de l'erreur de prédiction des réseaux de neurones

Ces résultats montrent que l'architecture qui présente le plus faible écart type 0,0011 et la valeur moyenne 0,0441 sera retenue dans nos expériences. À noter aussi qu'une seule couche cachée pour toute la carte peut être envisagée car l'écart type est faible.

5.5 Expérience et résultats

5.5.1 Résultats des deux approches : triangulation et réseaux de neurone

Dans un premier temps nous allons faire des expériences dans lesquelles le nœud mobile envoie des informations concernant la localisation. Nous allons ensuite comparer les deux solutions : la première solution basée sur la méthode de la triangulation installée sur le capteur mobile, la deuxième solution basée sur les réseaux de neurones installée sur un serveur.

La formation de la base de données des empreintes et la phase d'apprentissage ont été faites avec un pas de 25cm, nous allons changer les paramètres de la machine pour qu'elle fonctionne avec une vitesse de 0.5 m/min et avec un pas de 50cm. Ce changement nous permettra de vérifier le degré d'apprentissage de notre base d'empreintes. A chaque fois que le mobile détecte l'arrêt du convoyeur via l'accéléromètre, cet arrêt correspond un pas, le mobile estime sa position et l'envoie au serveur. Le serveur estime aussi la position. Il dispose donc des deux localisations. Il calcule l'écart de localisation, les résultats après avoir effectué un tour de la machine sont donnés sur la Figure 5-10.

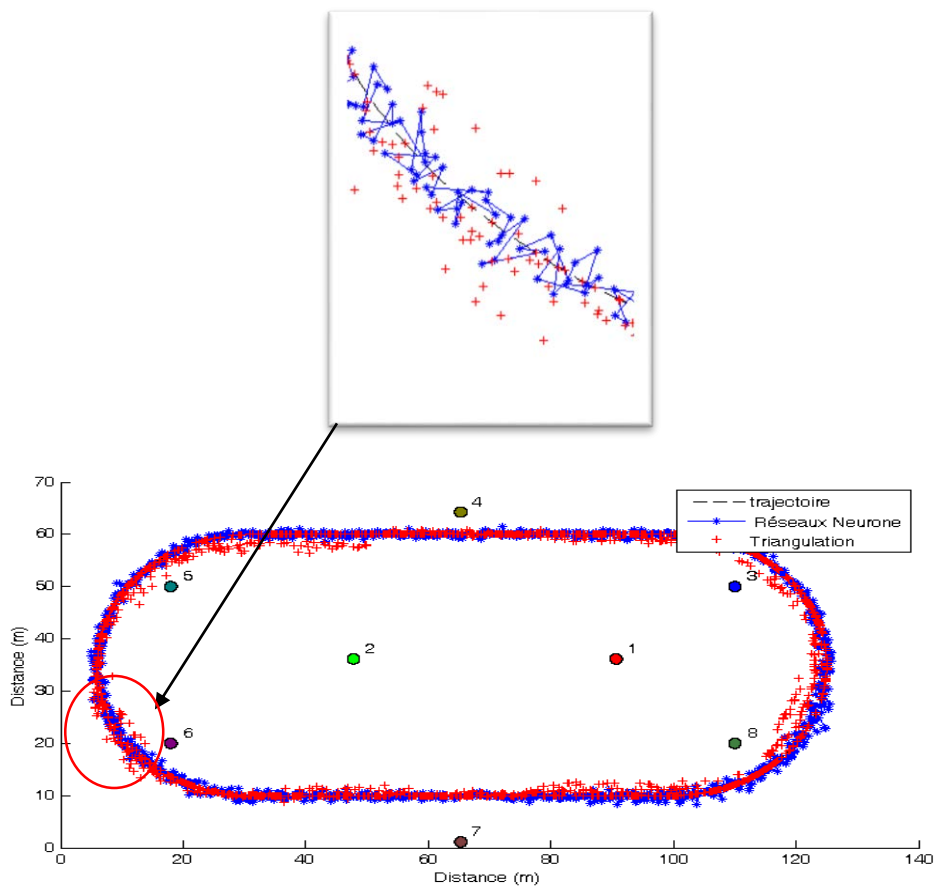


Figure 5-10 Les positions estimées avec les réseaux de neurone et triangulation

L'ensemble de ces expériences nous permet de tirer les éléments statistiques présentés dans le Tableau 5-3.

	Valeur Moyenne de l'erreur de position	Ecart type de l'erreur de position	Erreur de position <50cm
Triangulation	0.7251m	1.5692	48.75%
Réseaux de neurone	0.4454m	0.2745	71,34%

Tableau 5-3 Valeur moyenne et écart type des deux approches

L'analyse du tableau permet de tirer les conclusions suivantes :

- La valeur moyenne de l'approche basée sur le réseau de neurone est plus faible que celui de la première approche.
- Les écarts-types des erreurs de la deuxième approche obtenue sont ici beaucoup plus faibles que celui de la triangulation. L'approche basée sur les réseaux de neurone est donc plus efficace.

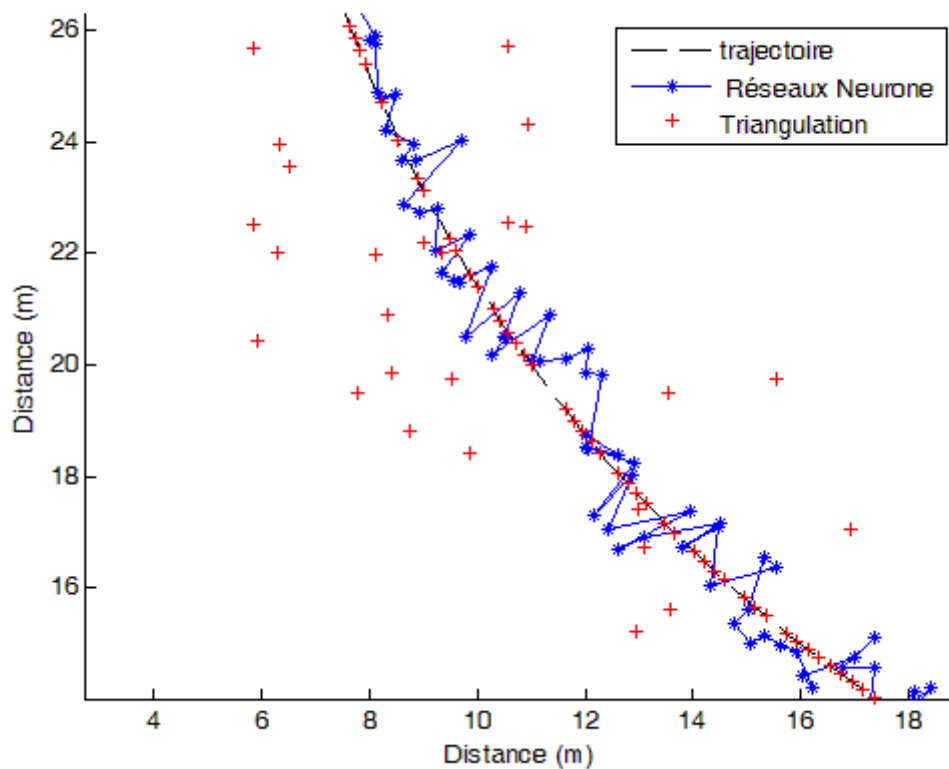


Figure 5-11 Un agrandissement d'une partie de la trajectoire

5.5.2 Projection sur la trajectoire

Nous remarquons sur la figure 5.11 que plus de 75% des positions n'appartiennent pas à la trajectoire du nœud mobile. Cette trajectoire est connue. Il suffit donc de l'utiliser pour forcer la localisation sur elle.

L'approche utilisée est de projeter la position estimée sur la trajectoire. Cette projection est réalisée sur la base de la perpendiculaire à la trajectoire passant par la position estimée. Pour réaliser cette étape il faut connaître la fonction géométrique modélisant la trajectoire. Il existe plusieurs méthodes d'interpolation comme entre autre celle de Bézier (Lee, J. H. et al., 1989).

Lors de la phase d'apprentissage, on recueille les coordonnées réelles de 1200 positions en 2D de la trajectoire, en se basant sur la géométrie de la trajectoire du convoyeur, ces données nous permettront de trouver la fonction de la trajectoire.

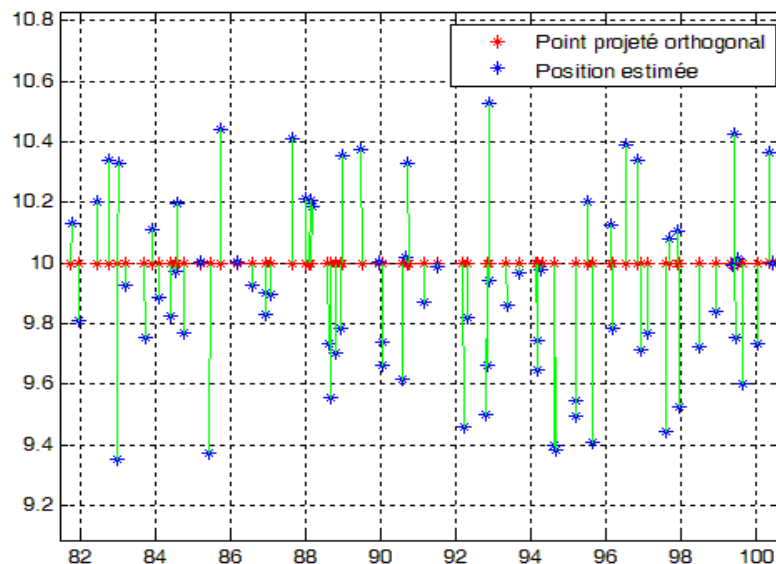


Figure 5-12 Les positions estimées par réseaux de neurone projetées sur la trajectoire du mobile

Nous allons coupler cette méthode avec les deux approches réseaux de neurone et la triangulation afin d'évaluer et comparer cette approche avec les autres cas, avec les mêmes conditions «une vitesse de 0.5 m/min et avec un pas de 50cm ».

Nous constatons qu'il y a une amélioration au niveau de l'estimation de la position entre la méthode sans et avec projection, la méthode qui affiche la valeur moyenne et l'écart type le plus faible est la solution qui utilise les réseaux de neurone et la projection (Tableau 5.4).

	Valeur Moyenne de l'erreur de position	Ecart type de l'erreur de position	Erreur de position <50cm
Réseaux de neurone	0.4454m	0.2745	71,34%
Réseaux de neurone avec Projection	0.2218m	0.1718	94.05%
Triangulation	0.7251m	1.5692	48.75%
Triangulation avec Projection	0,4648m	0,7984	64,39%

Tableau 5.4 Résultats des réseaux de neurone et la projection des positions estimées

La variation de l'erreur est donnée sur la Figure 5-13. On constate dans le tableau 5.4 que l'erreur est inférieure à 50cm dans 94 % des cas, la méthode basée sur la triangulation sans projection affiche une valeur moyenne de l'erreur de position de l'ordre de 0.7251m, mais avec la projection l'erreur moyenne baisse à 0,4648m. L'erreur maximale dans le cas de la méthode basée sur les réseaux de neurones et de l'ordre de 0.4454m, mais si on couple cette dernière méthode avec la projection, l'erreur passe à 0.2218m. On peut conclure que si on projette la position estimée sur la trajectoire l'erreur de position baisse. La méthode de réseaux de neurones affiche un résultat meilleur que celui de la méthode basée sur la triangulation.

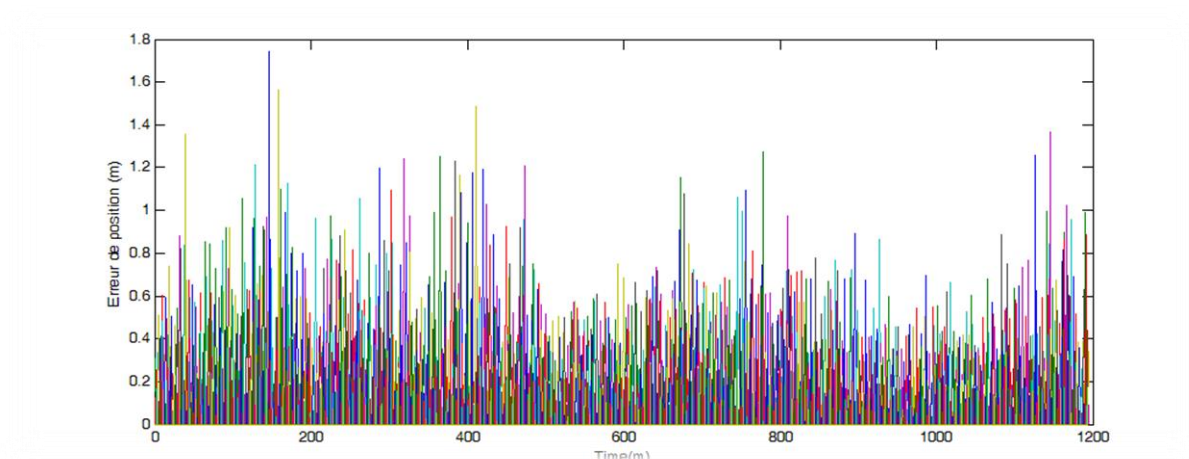


Figure 5-13 La variation de l'erreur de position dans le cas de réseaux de neurone

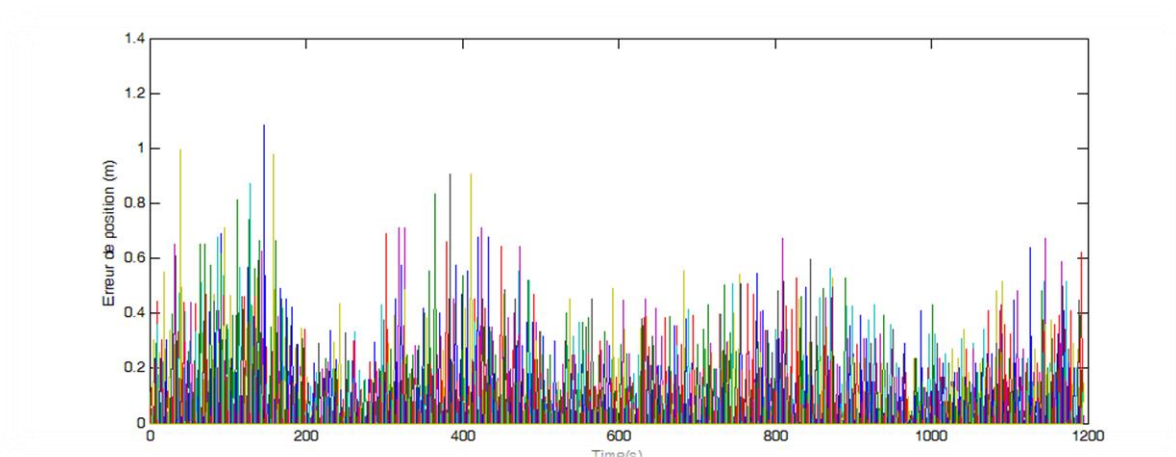


Figure 5-14 La variation de l'erreur de position en fonction du temps dans le cas de combinaison entre projection et réseaux de neurone

Les résultats obtenus à l'aide des réseaux de neurone et de la projection sur la trajectoire sont ici excellents. Nous augmentons donc le nombre d'essais pour tirer le maximum de conclusions.

Notre but était de trouver la relation entre l'erreur et la fréquence du calcul des positions. Malheureusement la machine ne peut pas fonctionner avec une vitesse qui nous permettra de mettre la solution dans ses limites.

Localisation et charge du réseau

Nous avons changé de stratégie, nous allons charger le réseau par un trafic concurrent, pour ce faire, nous avons programmé les nœuds fixes pour qu'ils fonctionnent comme des nœuds bavards, sans pour autant saturer le réseau.

En premier lieu, nous soulignons que la file d'attente côté du récepteur est soigneusement dimensionnée par le constructeur à 512 octets. Afin d'éliminer de nos expériences des problèmes liés à un débordement de file d'attente, nous avons réalisé des expériences préliminaires simples appropriées à quantifier la probabilité de débordement de la mémoire tampon. 9 nœuds peuvent transmettre en même temps à l'intérieur de la portée radio du récepteur. Dans nos expériences on a utilisé une vitesse de transmission unique correspondant à une période d'inter-arrivée des paquets de moyenne 200 ms. Mais nous avons également fait des essais avec des débits de transmission plus élevés, ce qui correspond à un temps d'inter-arrivée de 100 et 50 ms. Nos expériences permettent de conclure que le tampon du récepteur ne débordera jamais si le temps inter-paquet est supérieur ou égal à 100 ms. Dans ce qui suit, nous allons relever l'erreur de position en fonction du temps inter-paquet.

Après avoir effectué les essais, nous remarquons que la méthode basée sur la triangulation est meilleure que la méthode par empreintes- réseaux de neurones dans le cas où le temps inter-paquet est réglé sur la valeur 50ms (cf figure 5-15). Ceci est dû essentiellement au temps de transmission entre le nœud mobile et le serveur et à la perte de paquets à cause d'un

débordement de la file d'attente du récepteur. La méthode améliorée va l'emporter sur les deux autres à partir du temps inter-paquet de 300ms.

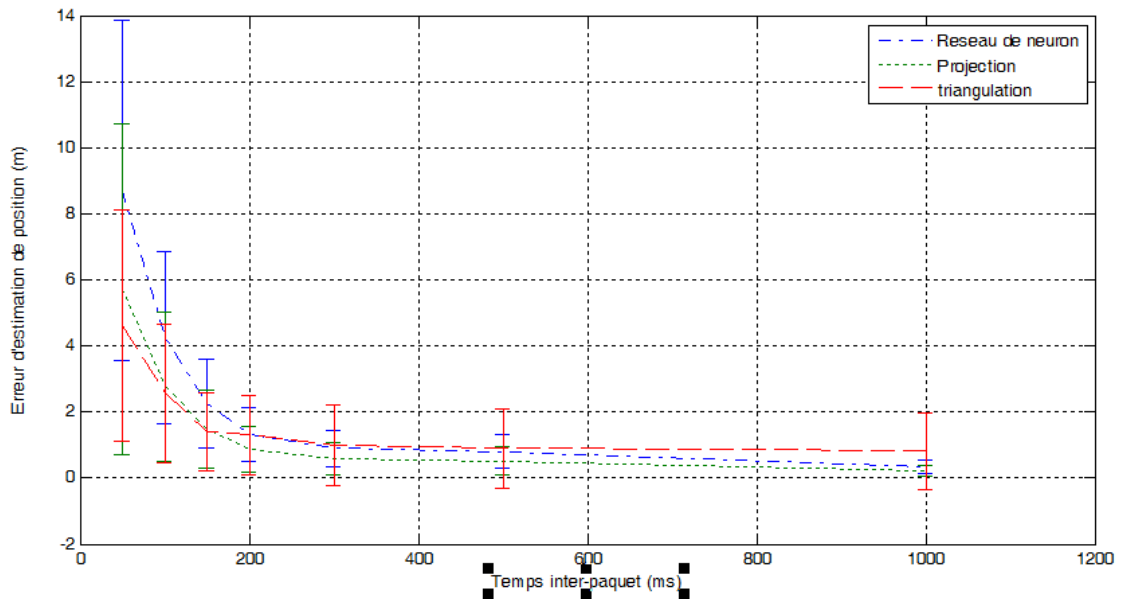


Figure 5-15 l'erreur de position en fonction du temps inter-paquet

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les deux méthodes testées pour la localisation du nœud mobile, dans un cas réel : la méthode de localisation centrée mobile basée sur la triangulation et la méthode centrée serveur fixe qui dépend seulement de la puissance du serveur sur lequel on a greffé la base de données des empreintes ainsi que le programme RNA. Nous avons déployé et exécuté nos deux approches sur les capteurs MicaZ de CrossBow.

Nous avons choisi cette plate-forme parce que nous croyons que pour beaucoup d'applications la localisation dans une trajectoire cyclique est importante. Ces applications utiliseront des petits appareils, peu coûteux, embarquables dans un système mobile tel que les machines à convoyeurs où les conditions de production influencent la qualité.

Nous avons montré qu'en couplant l'approche basée sur les réseaux de neurones à une projection, l'erreur de position est minimisée considérablement. À noter qu'on peut améliorer les résultats en augmentant le nombre de mesures de RSSI avec des puissances différentes par position.

Chapitre 6 : Conclusion

La surveillance étroite d'un grand équipement physique mobile sur une trajectoire unique connue est susceptible d'avoir des applications concrètes importantes tant pour la sécurité des utilisateurs que pour celle de l'équipement lui-même, pour sa maintenance et pour l'optimisation du service rendu. Elle existe, mais les technologies mises en œuvre sont spécifiques et coûteuses donc limitent l'instrumentation. L'utilisation d'un réseau de capteurs pris sur étagère pourrait diminuer fortement le coût de l'instrumentation et faciliter son déploiement. Le système pourrait ainsi être utilisé de manière temporaire pour des contrôles périodiques très détaillés. La surveillance de système mobile à l'aide d'un réseau de capteurs n'est pas décrite dans la bibliographie réalisée. Elle a constitué le sujet de l'étude menée pour cette thèse.

Nous avons défini un scénario assez précis, mais toutefois pas trop étroit de manière à définir de vraies problématiques de recherche et non un problème d'ingénierie spécifique. Le choix essentiel est d'avoir spécifié le système mobile : un grand équipement physique (mécanique) mobile sur une trajectoire unique connue.

L'objectif général de notre travail a donc été de concevoir un système de capteurs capable d'acquérir la bonne information au bon endroit, en temps voulu et avec suffisamment de précision et de transmettre les données à la station de traitement en temps réel et sans perte. Les données doivent toujours être associée avec lieu où elles ont été saisies, d'où l'importance de la localisation. L'état de l'art réalisé montre que la localisation est encore un problème mal résolu dans les réseaux de capteurs mobiles. Nous avons examiné les différentes solutions existantes et nous avons testé deux d'entre-elles sur un convoyeur industriel.

Comme la technologie est globalement déterminée en prenant les nœuds sur étagère, les variations de performances ne sont dépendantes que de la qualité de la topologie du réseau et de celle du routage. Les performances attendues sont un petit délai, mais surtout une bonne tenue à la charge, critère qui reflète le nombre de capteurs actifs en même temps, la taille des données et surtout la plus petite période de saisie des informations.

Pour que l'étude soit précise et approfondie, elle a été limitée aux systèmes se déplaçant sur une trajectoire circulaire. Hormis le cas particulier du petit rayon de la trajectoire et hors les moments particuliers où le puits peut être atteint directement, deux grandes options sont possibles et ont été examinées : celle pour laquelle le ou les capteurs transmettent vers des relais situés au sol, un réseau fixe permettant d'atteindre le puits et celle pour laquelle le ou les capteurs transmettent vers des relais embarqués sur le mobile, les paquets étant transférés dans le réseau embarqué jusqu'au relais à portée du puits à l'instant considéré. Pour chacune de ces options, les trois composantes de l'architecture ont été étudiées : la topologie, le routage et la localisation.

Pour le réseau de relais fixes, les travaux ont permis de proposer trois structures de topologies et de proposer des méthodes de calcul des emplacements des nœuds pour chacune d'elles. Toutes les topologies retenues ont la caractéristique que tout nœud, sauf celui pouvant communiquer avec le puits, a un voisin plus proche du puits que lui et que ce voisin possède la même propriété. Cette récursivité permet de choisir sans hésitation le routage géographique, l'algorithme glouton étant alors globalement optimal. Plusieurs solutions de localisation sont utilisables sur ces architectures, y compris la plus simple consistant à se positionner dans la cellule « portée radio » du relais interface qui reçoit le paquet venant du capteur.

La topologie du réseau de capteurs avec relais embarqués a aussi été étudiée en détail. Un protocole de routage adapté, basé également sur le principe du routage géographique, a été proposé. Ce protocole utilise deux paramètres liés au mouvement du mobile : sa position et sa vitesse. La localisation a été considérée comme existante, mais aucune solution particulière n'a été privilégiée.

Pour crédibiliser l'étude, une application virtuelle a été réalisée sur un grand système réel à visibilité internationale : la grande roue de Singapour, un bel exemple de système monolithique à trajectoire circulaire. Les performances des architectures proposées pour les deux options de topologie ont été évaluées par simulation sur ce système. Les résultats essentiels sont rassemblés dans le tableau 6.1. Ils peuvent ainsi être facilement comparés. Ils montrent la supériorité de l'approche par relais embarqués pour un tel système physique : meilleures performances et coût financier inférieur à ceux de l'approche par relais fixes. Elle devrait être performante pour tous les systèmes distribués pour lesquels la distance entre les modules est inférieure à la portée radio des nœuds, quelque soit la trajectoire. La tenue au facteur d'échelle doit toutefois être étudiée, par exemple pour des systèmes comme de grands télésièges.

Architecture	Nombre de nœuds relais	Nombre maximal de sauts	Charge supportée (période min paquets)	Délai d'acheminement
Grille à pavement carré optimisée	28	6	20 s	260 ms
Relais embarqués	0 (28 implicites)	15	175 ms	23 ms max

Tableau 6-1 Comparaison de deux architectures étudiées sur le cas de la Singapore Flyer

Toujours avec le même souci de réalité, un déploiement a été réalisé sur un convoyeur dans une usine de fabrication d'équipements électriques de la société Ingelec à Casablanca. Le temps disponible pour les expérimentations était contraint par celle de la durée de la maintenance interrompant la fabrication. C'est pourquoi seule la localisation a pu être testée à travers deux méthodes : la méthode centrée mobile basée sur la triangulation et la méthode « délocalisée » sur un serveur basée sur la classification d'empreintes par réseau de neurones artificiels. L'approche basée sur les réseaux de neurone et la projection sur la trajectoire minimise considérablement l'erreur de position.

Comparaison des topologies

Les topologies de réseaux de capteurs proposées dans cette thèse ont été étudiées pour répondre au mieux au besoin de l'application, la surveillance de grands systèmes se déplaçant sur une trajectoire circulaire. Au-delà de la comparaison du tableau 6.1., les résultats obtenus permettent de tirer quelques conclusions sur l'adaptation des topologies à la structure des systèmes physiques, c'est-à-dire indépendamment de la trajectoire de leur mouvement. Les contraintes imposées par la structure d'un système ne permettent pas toujours de déployer toutes les topologies proposées. Il en résulte que toutes les architectures proposées ont leur utilité et certaines sont les seules utilisables pour certaines structures de systèmes physiques. Par exemple, il est impossible de déployer une topologie de relais embarqués sur un système isolé.

Pour beaucoup de systèmes monolithiques et pour les systèmes distribués, les solutions proposées sont concurrentes, il convient alors de choisir la plus performante au meilleur coût financier. Le tableau 6.2 résume la comparaison des topologies proposées avec leurs avantages et inconvénients respectifs et la meilleure adaptation constatée aux structures des systèmes.

Topologie	Avantages	Inconvénients	Structure favorite de système
Relais fixes, pavement carré	Utilisation des relais pour localisation (ancres ou cellule)	- Nécessite beaucoup de relais dans grands systèmes - Performances moyennes si beaucoup de capteurs actifs	Système isolé
Relais fixes de bordure	Utilisation des relais aisée pour localisation grossière (cellule)	Nécessite beaucoup de relais dans grands systèmes	- Système isolé - Système onolithique non équipable en relais
Relais embarqués	- Pas besoin de nœuds supplémentaires, relais assurés par les capteurs dans systèmes distribués ou monolithiques - Bonne performance pour ces systèmes	Pas d'ancres pour localisation	- Système distribué - Système monolithique (cas général)

Tableau 6-2 Adaptation des topologies de réseau aux typologies de systèmes physiques

Perspectives

Le travail de recherche mené dans cette thèse ouvre de nombreuses perspectives tant pour approfondir les travaux réalisés que pour les étendre à d'autres systèmes physiques.

Une amélioration possible des performances du réseau avec topologie de relais embarqués pourrait être obtenue par agrégation de paquets. Avec cette architecture et lorsque tous les capteurs sont actifs, une agrégation successive des paquets traversant les nœuds serait certainement efficace. En supposant une synchronisation des mesures sur tous les nœuds, le nœud le plus éloigné du nœud relais interface prendrait l'initiative de l'envoi d'un paquet avec ses données au nœud voisin dans la direction du nœud relais par la route la plus courte. Ce nœud voisin ajouterait ses données au paquet reçu avant de l'envoyer à son voisin toujours dans la direction du relais interface, et ainsi de suite. Compte tenu de la taille maximale de la trame du protocole 802.15.4, c'est-à-dire 127 octets, de la taille de chaque donnée fixée dans le scénario utilisé à 20 octets, de l'entête pour l'adressage et de la terminaison pour la clé de vérification, 6 paquets successifs peuvent être agrégés. Ce procédé allégerait le nombre de paquets à proximité du puits, le goulot d'étranglement du réseau. Il compliquerait significativement le protocole de formation et de transmission des paquets puisque celui-ci doit tenir compte de la position instantanée du nœud. Le test d'un tel procédé fait partie des perspectives du travail après cette thèse.

Pour améliorer les performances du réseau de capteurs, une piste est d'utiliser des antennes directionnelles à la place des antennes omnidirectionnelles. Les antennes directionnelles permettent d'améliorer la qualité de service dans un réseau de capteurs, la qualité de localisation basée sur les signaux de communication et de diminuer la consommation des nœuds (Dunlop et al., 2007) . Si elles posent des problèmes dans les réseaux à placement aléatoire des nœuds, elles sont appropriées pour un placement déterministe comme c'est le cas dans notre application. Une étude approfondie sur l'utilisation de ces antennes dans nos architectures et des tests en vraie grandeur donneraient probablement des résultats intéressants.

La localisation à l'aide d'accéléromètres a été sommairement étudiée comme nous l'avons relaté dans le paragraphe 3.6.4. Il faudrait reprendre ce travail en collaboration avec des spécialistes en modélisation et en filtrage du laboratoire pour aboutir à une solution de localisation économique, précise et robuste.

Certaines applications de surveillance, qui analysent finement l'évolution des phénomènes mesurés et qui corrélient les données provenant des différents capteurs distribués sur l'équipement, ont besoin que les mesures soient datées avec précision. Pour ce faire les horloges des capteurs doivent être synchronisées. Un procédé de synchronisation d'un réseau de capteurs comme celui proposé par (Ganeriwal et al., 2003) devrait résoudre le problème. Il faudrait l'implémenter et le tester sur chacune des architectures proposées, certaines sont peut-être mieux adaptées que d'autres à cette synchronisation.

Un travail plus ambitieux consiste à étudier d'autres grands systèmes physiques se déplaçant sur des trajectoires non circulaires. Les systèmes qui sont en vue sont les plus grands télésièges et les transporteurs aériens de matériaux à godets qui se déplacent sur deux chemins parallèles en sens opposés. Comme l'indique la synthèse précédente, l'architecture basée sur une topologie de nœuds embarqués est sans doute bien adaptée. Nous chercherons des partenaires pour la doter de la localisation adéquate et pour l'expérimenter sur un vrai système opérationnel.

Liste des figures

Figure 2-1 Réseau avec un seul saut	16
Figure 2-2 Réseau avec relais embarqués	16
Figure 2-3 Réseau avec relais au sol	17
Figure 2-4 Exemple d'un réseau de capteurs	19
Figure 2-5 Les composants d'un nœud capteur	21
Figure 2-6 Localisation à l'aide d'ancres	27
Figure 2-7 Localisation à base de distance par trilatération.....	28
Figure 2-8 Localisation à base d'angles et triangulation.....	31
Figure 3-1 Singapore Flyer	39
Figure 3-2 Eolienne Haliade 150	39
Figure 3-3 Petit rayon, puits décalé du centre d'une distance a	40
Figure 3-4 . Trajectoire circulaire.....	41
Figure 3-5 Cartographie de la couverture radio	42
Figure 3-6 Grille à pavement carré centrée sur le centre du cercle.....	44
Figure 3-7 Un seul sommet intérieur.....	44
Figure 3-8 Deux sommets voisins intérieurs.....	45
Figure 3-9 . Deux sommets opposés intérieurs	45
Figure 3-10 . Existence de $NR_{Im,m}$	47
Figure 3-11 . La topologie pour $r= 100$ m et $R_c = 10$ m	47
Figure 3-12 Optimisation de la topologie dans le premier quadrant.....	50
Figure 3-13 Topologie type chemin de bordure.....	51
Figure 3-14 Calcul du nombre de relais	52
Figure 3-15 : Couverture de la trajectoire avec les nœuds de bordure.....	54
Figure 3-16 Résultat des emplacements des nœuds relais avec l'arbre de Steiner	56
Figure 3-17 Association (β , empreinte du RSSI)	60
Figure 3-18 Schéma de la plateforme.	61
Figure 3-19 Repère lié à l'accéléromètre	61
Figure 3-20 Mesure des accélérations radiales et tangentielles	62
Figure 3-21 Topologie de l'exemple sur grille à pavement carré optimisée et un capteur	63

Figure 3-22 Délais de bout en bout pour un capteur et 3 valeurs de période inter-paquets	65
Figure 3-23 Topologie de l'exemple sur grille à pavement carré optimisée et dix capteurs ...	67
Figure 3-24 Délai de bout en bout pour 10 capteurs et une période inter-paquet de 5 s.....	68
Figure 3-25 Topologie avec relais en bordure de la trajectoire.....	69
Figure 3-26 Délai de bout en bout avec topologie de bordure	70
Figure 3-27 Topologie pour la surveillance d'une nacelle de la roue Singapore Flyer	71
Figure 3-28 Délai d'acheminement pour une période inter-paquet de 100 ms.	72
Figure 3-29 Topologie avec un capteur par nacelle	72
Figure 3-30 Délai d'acheminement pour une période inter-paquet de 20 s avec 28 capteurs .	73
Figure 4-1 Calcul du rayon de propagation R_c	77
Figure 4-2 Sens de transfert des paquets et sens de déplacement du mobile	79
Figure 4-3 Position des nœuds mobiles en coordonnées polaires	81
Figure 4-4 . Délai d'acheminement de bout en bout des parquets pour le nœud 1	83
Figure 4-5 Taux de perte de parquets en fonction de leur période de génération	85
Figure 5-1 Chaîne de peinture avec convoyeur.....	88
Figure 5-2 la position des nœuds relais et ancrés	89
Figure 5-3 Triangulation pour un nœud : Zone d'intersection	91
Figure 5-4 Exemple de réseaux de neurone	93
Figure 5-5 Réseaux de neurones à une seule couche cachée, F_i est la fonction d'activation, W_i les poids et b_i le biais	94
Figure 5-6 exemple du principe de la descente de gradient : cas d'une fonction à une variable	96
Figure 5-7 Le graphe de l'accéléromètre	98
Figure 5-8 fonction linéaire.....	98
. Figure 5-9 fonction sigmoïde	98
Figure 5-10 Les positions estimées avec les réseaux de neurone et triangulation	100
Figure 5-11 Un agrandissement d'une partie de la trajectoire	101
Figure 5-12 Les positions estimées par réseaux de neurone projetées sur la trajectoire du mobile	102
Figure 5-13 La variation de l'erreur de position dans le cas de réseaux de neurone	103
Figure 5-14 La variation de l'erreur de position en fonction du temps dans le cas de combinaison entre projection et réseaux de neurone	104
Figure 5-15 l'erreur de position en fonction du temps inter-paquet	105

Liste des tableaux

Tableau 3-1 Tenue à la charge pour un capteur et une vitesse de 5m/s	65
Tableau 3-2 Tenue à la charge pour un capteur et une vitesse de 28 m/s	66
Tableau 3-3 Tenue à la charge pour dix capteurs.....	67
Tableau 3-4 Tenue à la charge une topologie à relais de bordure	69
Tableau 3-5 Tenue à la charge pour un seul capteur	71
Tableau 3-6 Tenue à la charge pour 28 capteurs.....	73
Tableau 4-1 Paramètres de simulation	82
Tableau 4-2 Comparaison des délais de bout en bout.....	84
Tableau 4-3 Période minimale d'échantillonnage pour différents réglages de B-MAC	85
Tableau 5-1 Différentes possibilités d'assemblage de fonctions.....	99
Tableau 5-2 Ecart type et la valeur moyenne de l'erreur de prédiction des réseaux de neurones	99
Tableau 5-3 Valeur moyenne et écart type des deux approches	101
Tableau 6-1 Comparaison de deux architectures étudiées sur le cas de la Singapore Flyer ..	108
Tableau 6-2 Adaptation des topologies de réseau aux typologies de systèmes physiques	109

Tables d'abréviations

AOA	Angle Of Arrival : Angles d'arrivée
EKF	Extended Kalman Filter : Extension du filtrage de Kalman
TDOA	Time Difference Of Arrival : Mesure de la différence des temps d'arrivée
TOA	Time Of Arrival : Temps d'arrivée
UWB	Ultra WideBand
RSSI	Received Signal Strength Indicator : indicateur de puissance de signal à la réception
RSS	Received Signal Strength : puissance de signal à la réception
GPS	Global Positioning System : (Système de positionnement par satellites)
CC2420	Reference du circuit radio utilisée sur nos capteurs MicaZ
RNA	Réseau de Neurones Artificiel
MANETs	Mobile Ad-hoc NETwork : Réseau mobile ad hoc
WSN	Wireless Sensor Network : Réseau de capteurs sans fil
O-QPSK	Offset quadrature phase-shift keying : Modulation en quadrature de phase à décalage

Liste des publications de l'auteur

Chafik, A., Lepage, F. (2011). Topologie et performance d'un réseau de capteurs en mobilité cyclique. *Journées Doctorales/Journées Nationales MACS, JD/JNMACS*, Marseille, juillet.

Chafik, A., Lepage, F. (2012). An experimental approach to prove the efficiency of a cyclic topology of a sensor network. *International Conference on Complex Systems, IEEE ICCS'12*, Maroc.

Chafik, A., Lecuire, V., Lepage, F. (2014). Sensors Networks topologies for monitoring a large system in cyclic mobility. *Accepted in IEEE - I2MTC 2014 - International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Montevideo, Uruguay, May 12-15*.

Ce papier a été retiré volontairement après acceptation en raison du coût engendré pour sa présentation.

Chafik, A., Lecuire, V., Lepage, F. (2014). Wireless Sensor Network Architecture for Monitoring Large Physical System in Cyclic Mobility. *Accepted in 19th World IFAC Congress, Cape Town, South Africa, 24-29 August*.

Bibliographie

- Abuhadrous, I. (2005). *Système embarqué temps réel de localisation et de modélisation 3D par fusion multi-capteur*. (Thèse de Doctorat en Informatique temps réel – Robotique – Automatique), École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Ahmed, U., and Hussain, F.-B. (2011). *Energy efficient routing protocol for zone based mobile sensor networks*. Proceedings of the Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). IEEE
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4), 393-422.
- Aspnès, J., Eren, T., Goldenberg, D. K., Morse, A. S., Whiteley, W., Yang, Y. R., Belhumeur, P. N. (2006). A theory of network localization. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 5(12), 1663-1678.
- Basagni, S., Petrioli, C., and Petrocchia, R. (2008). Efficiently reconfigurable backbones for wireless sensor networks. *Computer Communications*, 31(4), 668-698.
- Bertaux, L. (2013). *Architecture réseau pour véhicule de transport en commun communiquant*. (Thèse de Doctorat), Université Toulouse 3 Paul Sabatier. September 2013
- Chelius, G., Fraboulet, A., and Hamida, E. B. (2007). Wsnet: simulator : <http://www.worldsens.net>.
- Chen, J., Kher, S., and Somani, A. (2006). *Distributed fault detection of wireless sensor networks*. Proceedings of DIWANS'06 workshop on Dependability issues in wireless ad hoc networks and sensor networks ACM
- Cheng, K.-Y., Lui, K.-S., and Tam, V. (2009). Hybloc: Localization in sensor networks with adverse anchor placement. *Sensors*, 9(1), 253-280.
- Chintalapudi, K., Fu, T., Paek, J., Kothari, N., Rangwala, S., Caffrey, J., Masri, S. (2006). Monitoring civil structures with a wireless sensor network. *Internet Computing, IEEE*, 10(2), 26-34.
- Christin, D., Mogre, P. S., and Hollick, M. (2010). Survey on wireless sensor network technologies for industrial automation: The security and quality of service perspectives. *Future Internet*, 2(2), 96-125.
- Cunha, A., Koubaa, A., Severino, R., and Alves, M. (2007). *Open-ZB: an open-source implementation of the IEEE 802.15. 4/ZigBee protocol stack on TinyOS*. Proceedings of IEEE MASS '07 Mobile Adhoc and Sensor Systems IEEE
- Dakkak, M. (2012). *Indoor geo-location : static and dynamic geo-location of mobile terminals in indoor environments*. . (Thèse de Doctorat en informatique), Université Paris-Est. 29 novembre
- Dalce, R., Van den Bossche, A., and Val, T. (2012). *Une plateforme de prototypage évolutive pour la localisation dans un réseau IEEE 802.15. 4a CSS (regular paper)*. Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA), Grenoble
- Datasheet, M. (2006). Crossbow Technology Inc. *San Jose, California*.

- Dunlop, J., and Cortés, J. (2007). Impact of Directional Antennas in Wireless Sensor Networks. *Proceedings of IEEE MASS '07 Mobile Adhoc and Sensor Systems*.
- Duquenne, F., Botton, S., Peyret, F., Bétaille, D., and Willis, P. (2005). *Les GPS: localisation et navigation par satellites* (2e édition revue et augmentée ed.): Hermes.
- Duran-Faundez, C., Lecuire, V., and Lepage, F. (2011). Tiny block-size coding for energy-efficient image compression and communication in wireless camera sensor networks. *Signal Processing: Image Communication*, 26(8), 466-481.
- Ergen, S. C. (2004). ZigBee/IEEE 802.15. 4 Summary. *UC Berkeley Sept, 10*.
- Fourty, N., Van Den Bossche, A., and Val, T. (2012). An advanced study of energy consumption in an IEEE 802.15. 4 based network: Everything but the truth on 802.15. 4 node lifetime. *Computer Communications*, 35(14), 1759-1767.
- Ganeriwal, S., Kumar, R., and Srivastava, M. B. (2003). *Timing-sync protocol for sensor networks*. Los Angeles, California, USA. Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems ACM
- Grewal, M. S., Weill, L. R., and Andrews, A. P. (2007). *Global positioning systems, inertial navigation, and integration* (Second Edition ed.): John Wiley & Sons.
- Gupta, G., and Younis, M. (2003). *Fault-tolerant clustering of wireless sensor networks*. (WCNC) Wireless Communications and Networking IEEE
- Hagan, M. T., and Menhaj, M. B. (1994). Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 5(6), 989-993.
- Han, Y., and Lin, Z. (2012). *A geographically opportunistic routing protocol used in mobile wireless sensor networks*. 9th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). IEEE
- Herring, C., and Kaplan, S. (2000). Component-based software systems for smart environments. *IEEE Personal Communications*, 7(5), 60-61.
- Heurtefeux, K., and Valois, F. (2012). *Is RSSI a good choice for localization in Wireless Sensor Network?* IEEE 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). IEEE
- Hull, B., Bychkovsky, V., Zhang, Y., Chen, K., Goraczko, M., Miu, A., Madden, S. (2006). *CarTel: a distributed mobile sensor computing system*. Proceedings of ACM SenSys ACM
- Kahn, J. M., Katz, R. H., and Pister, K. S. (1999). *Next century challenges: mobile networking for "Smart Dust"*. Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking ACM
- Kim, S., Pakzad, S., Culler, D., Demmel, J., Fenves, G., Glaser, S., and Turon, M. (2007). *Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks*. ACM Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2007 IEEE
- Kleinrock, L., and Silvester, J. (1978). *Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number*. Birmingham, Alabama

Proceedings of the IEEE National Telecommunications Conference

- Koutsopoulos, I., and Tassiulas, L. (2013). Fast neighbor positioning and medium access in wireless networks with directional antennas. *Ad Hoc Networks*, 11(2), 614-624.
- Kurková, V. (1992). Kolmogorov's theorem and multilayer neural networks. *Neural Networks*, 5(3), 501-506.
- Kwangcheol, S., Kyungjun, K., and Soontae, K. (2011). *ADSR: Angle-based Multi-Hop Routing Strategy for Mobile Wireless Sensor Networks*. IEEE Asia-Pacific Services Computing conference (APSCC). IEEE
- Langendoen, K., and Reijers, N. (2003). Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison. *Computer Networks*, 43(4), 499-518.
- Lee, J. H., and Yang, S. N. (1989). Shape preserving and shape control with interpolating Bezier curves. *Journal of computational and applied mathematics*, 28, 269-280.
- Lee, U., Zhou, B., Gerla, M., Magistretti, E., Bellavista, P., and Corradi, A. (2006). Mobeyes: smart mobs for urban monitoring with a vehicular sensor network. *Wireless Communications, IEEE*, 13(5), 52-57.
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, 2, 164-168.
- Lima-Filho, A. C., Gomes, R. D., Adissi, M. O., Borges, T. A., Belo, F. A., and Spohn, M. A. (2012). Embedded system integrated into a wireless sensor network for online dynamic torque and efficiency monitoring in induction motors. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 17(3), 404-414.
- Lin, G.-H., and Xue, G. (1999). Steiner tree problem with minimum number of Steiner points and bounded edge-length. *Information Processing Letters*, 69(2), 53-57.
- Lloyd, E. L., Liu, R., Marathe, M. V., Ramanathan, R., and Ravi, S. (2005). Algorithmic aspects of topology control problems for ad hoc networks. *Mobile Networks and applications*, 10(1-2), 19-34.
- Loureiro, A. A. F., and Ruiz, L. B. (2007). *Autonomic Wireless Networks in Smart Environments*. IEEE CNSR'07, Communication networks and Services research IEEE
- Lu, B., and Gungor, V. C. (2009). Online and remote motor energy monitoring and fault diagnostics using wireless sensor networks. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 56(11), 4651-4659.
- Mamun, Q. (2012). A qualitative comparison of different logical topologies for wireless sensor networks. *Sensors*, 12(11), 14887-14913.
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, 11(2), 431-441.
- Mauve, M., Widmer, J., and Hartenstein, H. (2001). A survey on position-based routing in mobile ad hoc networks. *Network, IEEE*, 15(6), 30-39.
- Michaut, F., and Lepage, F. (2005). Application-oriented network metrology: Metrics and active measurement tools. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 7(2).

- OPNET. (2014). *Modeler* [Online]. Available: . Retrieved from: <http://www.opnet.com/products/modeler/home.html>
- Polastre, J., Hill, J., and Culler, D. (2004). *Versatile low power media access for wireless sensor networks*. Proceedings of ACM SenSys'04, 2nd international conference on Embedded networked sensor systems ACM
- Priyantha, N. B. (2005). *The Cricket Indoor Location System*. (PhD Thesis), Massachusetts Institute of Technology. June 2005
- Rajaravivarma, V., Yang, Y., and Yang, T. (2003). *An overview of wireless sensor network and applications*. Proceedings of the 35th IEEE Southeastern Symposium on System Theory
- Renugadevi, G., and Sumithra, M. An Analysis on LEACH-Mobile Protocol for Mobile Wireless Sensor Networks. *International Journal of Computer Applications* 65(21):38-42.
- Ringwald, M., and Romer, K. (2005). *BitMAC: A deterministic, collision-free, and robust MAC protocol for sensor networks*. IEEE second European Workshop on Wireless Sensor Network. IEEE
- Royer, E. M., Melliar-Smith, P. M., and Moser, L. E. (2001). *An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks*. Helsinki, Finland.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533-536.
- Salvadori, F., de Campos, M., Sausen, P. S., de Camargo, R. F., Gehrke, C., Rech, C., Oliveira, A. C. d. (2009). Monitoring in industrial systems using wireless sensor network with dynamic power management. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 58(9), 3104-3111.
- Shen, Y., Li, B., and Chen, Y. (2011). An iterative solution of weighted total least-squares adjustment. *Journal of Geodesy*, 85(4), 229-238.
- Sterbenz, J. P., Hutchison, D., Çetinkaya, E. K., Jabbar, A., Rohrer, J. P., Schöller, M., and Smith, P. (2010). Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Computer Networks*, 54(8), 1245-1265.
- Tan, K. K., Huang, S., Zhang, Y., and Lee, T. H. (2009). Distributed fault detection in industrial system based on sensor wireless network. *Computer Standards & Interfaces*, 31(3), 573-578.
- Wang, J., Fu, L., Han, H., Min, H., and Kang, L. (2013). A Low-Cost Configurable ISO/IEC/IEEE 21451-7-compatible Sensor Tag.
- Wang, J., and Tang, J. (2011). *Design and implementation of WSN monitoring system for grain depot based on XBee/XBee Pro*. Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011 International Conference on IEEE
- Weinberg, H., and Lemaire, C. (1998). Using the ADXL202 accelerometer as a multifunction sensor (tilt, vibration and shock) in car alarms. *Techn. Note, Rev. A, Analog Devices*, 4.

- Werner-Allen, G., Lorincz, K., Ruiz, M., Marcillo, O., Johnson, J., Lees, J., and Welsh, M. (2006). Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *Internet Computing, IEEE*, 10(2), 18-25.
- Woodman, O., and Harle, R. (2008). *Pedestrian localisation for indoor environments*. Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing ACM
- Yang, Z., Dong, M., Tong, L., and Sadler, B. M. (2004). *On the MAC for optimal information retrieval pattern in sensor networks with mobile access*. (MILCOM) Military Communications Conference. 2004 IEEE
- Yigitel, M. A., Incel, O. D., and Ersoy, C. (2011). QoS-aware MAC protocols for wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 55(8), 1982-2004.
- Yu, H., and Wilamowski, B. (2011). Levenberg-marquardt training. *The Industrial Electronics Handbook*, 5, 1-15.
- Zhao, J., and Cao, G. (2006). VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. *IEEE INFOCOM'06*, Barcelona, Spain, April.

Résumé

La surveillance étroite d'un grand équipement physique mobile sur une trajectoire unique connue est susceptible d'avoir des applications concrètes importantes pour la sécurité des utilisateurs et de l'équipement lui-même, pour sa maintenance et pour l'optimisation du service rendu. Cette surveillance nécessite d'instrumenter l'équipement. Cette instrumentation à l'aide d'un réseau de capteurs pris sur étagère constitue l'application de l'étude menée dans cette thèse.

Les problématiques de recherche concernent trois domaines : la topologie des réseaux de capteurs mobiles, le routage et la localisation. Elles sont situées par rapport à l'état de l'art. Puis une étude approfondie de l'architecture du réseau pour sur un système physique parcourant une trajectoire circulaire a été menée. La grande roue de Singapour (Singapore Flyer) est utilisée comme système type. Deux sortes de topologie ont été étudiées : une dans laquelle la liaison système mobile – partie fixe au sol est située au niveau du ou des capteurs, l'autre pour laquelle la liaison système mobile - partie fixe au sol est située au niveau du puits. Les meilleurs placements des relais ont été proposés ainsi que des algorithmes de routage géographique adaptés à chaque cas. Les performances du réseau sont mesurées par simulation. Elles montrent un bon fonctionnement pour des phénomènes dynamiques assez rapides et permettent de comparer les architectures entre-elles. Enfin une expérimentation de localisation des nœuds à base de RSSI a été menée sur un site industriel.

Mots-clés : [Réseau de capteurs sans fil, réseau de capteurs mobiles, topologie, surveillance de système, routage géographique]

Summary

The close supervision of a large physical equipment moving on a single known trajectory is likely to have important practical applications for the safety of users and the equipment itself, for maintenance and optimization of the provided service. This requires deploying monitoring instruments on equipment. This instrumentation using a sensor network taken off the shelf is the application of the study conducted in this thesis.

The research problems address three areas: the topology of mobile sensor networks, routing and localization. They are situated in relation to the state of the art. Then a detailed study of the network architecture for a physical system moving on a circular path was conducted. Giant observation wheel of Singapore (Singapore Flyer) is used as a type system. Two kinds of topology were considered: one in which the connection mobile system - fixed part at the ground is located at sensor interface, one for which the link mobile system - fixed part at the ground is located at sink interface. The best placements of the relays have been proposed as well as geographic routing algorithms adapted to each case. The network performance is measured by simulation. The results show a correct working for fairly rapid dynamic phenomena and allow to compare architectures with each other. Finally an experiment of node localization based on RSSI was conducted on an industrial site.

Keywords : [Wireless sensor network, mobile sensor network, topology, system monitoring, geographic routing]