

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A/Mira de Béjaïa
Faculté des Sciences Exactes
Département d'Informatique



MÉMOIRE DE MASTER EN INFORMATIQUE

Option

Administration et Sécurité des Réseaux

Thème

Mise en place d'une solution pour la détection
des frontières dans les RCSF

Réalisé par:

Mme *HAMED KHODJA* Nesrine

Mme *TEKFA* Kenza

| | | |
|-----------|----------------------|-------|
| Président | Dr. AISSANI Sofiane | M.C.A |
| Examineur | Dr. KACIMI Farid | M.C.B |
| Encadreur | Dr. ABBACHE Bournane | M.C.B |

Béjaïa, Septembre 2020.

Remerciements

En premier lieu nous remercions le grand dieu, pour nous avoir donné la force, le courage et la patience pour pouvoir accomplir ce travail et terminer nos études.

Nous adressons nos sincères remerciements à nos chères parents pour nous avoir donné leur soutien encouragement pour terminer ce travail.

Nous exprimons tout nos remerciements à notre chère encadreur ABBACHE Bournane pour tout ses efforts, ses conseils, son aide et sa disponibilité durant toute l'année.

Nous adressons aussi nos profondes gratitudeux aux messieurs les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous exprimons nos profonde gratitude à tout celles et ceux qui nous ont apporté leur soutiens, leur amitié et leur expérience tout au long de ce travail.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail À
La mémoire de mon père
Ma mère
Mon frère et mes soeurs
Chère mimi
Mes amies
Ma binôme*

TEKFA Kenza

*Je dédie ce modeste travail
À mes chère parents, que je les souhaite la bonne santé et longue vie
À tout mes proches de la famille HAMED KHODJA et DRIBINE et plus
particulièrement mes soeurs et mes frères Ines, Imane, Riadh, Redeoune
À ma binôme Kenza
À tous mes chères amies katia, Yasmine, Amina*

HAMED KHODJA Nesrine

Table des matières

| | |
|---|------------|
| Table des matières | ii |
| Table des figures | iii |
| Liste des tableaux | 1 |
| Introduction générale | 1 |
| 1 Généralités sur les RCSF | 4 |
| 1.1 Introduction | 4 |
| 1.2 Présentation des réseaux de capteurs sans fil | 4 |
| 1.2.1 Définition d'un RCSF | 4 |
| 1.2.2 Définition d'un noeud capteur | 5 |
| 1.2.3 Architecture d'un noeud capteur | 5 |
| 1.2.3.1 Unité d'acquisition | 6 |
| 1.2.3.2 Unité de traitement | 6 |
| 1.2.3.3 Unité de communication | 7 |
| 1.2.3.4 Unité d'alimentation | 7 |
| 1.3 Caractéristiques des RCSFs | 7 |
| 1.4 Contraintes et limites des RCSFs | 8 |
| 1.5 Architecture de communication des RCSFs | 9 |
| 1.5.1 La pile protocolaire dans un RCSF | 9 |
| 1.6 Domaines d'application des RCSFs | 11 |
| 1.6.1 Applications militaires | 11 |
| 1.6.2 Applications environnementales | 12 |
| 1.6.3 Applications médicales | 12 |
| 1.6.4 Applications industrielles | 13 |
| 1.6.5 Applications de la sécurité | 13 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1.6.6 | Les villes intelligentes | 13 |
| 1.6.7 | Autre applications additionnelles | 13 |
| 1.7 | La localisation dans les RCSFs | 13 |
| 1.7.1 | Les contraintes de la localisation : | 14 |
| 1.7.2 | Les techniques de la localisation | 14 |
| 1.7.2.1 | Techniques d'estimation des coordonnées | 15 |
| 1.7.2.2 | Les techniques de mesures | 15 |
| 1.7.2.3 | Les technologies de mesure | 16 |
| 1.8 | Conclusion | 17 |
| 2 | État de l'art | 18 |
| 2.1 | Introduction | 18 |
| 2.2 | Taxonomie des protocoles existants | 18 |
| 2.3 | Classification | 37 |
| 2.3.1 | Comparaison des protocoles étudiés | 38 |
| 2.4 | Conclusion | 40 |
| 3 | Contribution et simulations | 41 |
| 3.1 | Introduction | 41 |
| 3.2 | Présentation du problème | 41 |
| 3.3 | Description de la solution | 42 |
| 3.3.1 | Dissimulation | 42 |
| 3.4 | Les phases de la solution proposée | 44 |
| 3.4.1 | La découverte de réseau | 44 |
| 3.4.2 | La localisation des noeuds capteurs | 45 |
| 3.4.3 | La découverte de la frontière | 46 |
| 3.5 | L'algorithme proposé | 47 |
| 3.6 | Évaluation des performances | 48 |
| 3.6.1 | Paramètres de simulation | 50 |
| 3.6.2 | Résultat obtenus | 52 |
| 3.7 | Conclusion | 57 |
| | Conclusion générale | 58 |
| | Bibliographie | 59 |

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Architecture d'un RCSF [2] | 5 |
| 1.2 | Architecture matérielle d'un noeud capteur [2] | 6 |
| 1.3 | Architecture de communication d'un RCSF [4] | 10 |
| 1.4 | Pile protocolaire d'un RCSF [4] | 11 |
| 1.5 | Applications des RCSFs | 12 |
| 2.1 | La phase de la construction du chemin [14] | 20 |
| 2.2 | La frontière d'un trou et les noeuds à sa limite [11] | 21 |
| 2.3 | Illustration d'un polygone extérieur[5] | 22 |
| 2.4 | Illustration d'un polygone intérieur[5] | 23 |
| 2.5 | La première étape du processus DLPCN[21] | 24 |
| 2.6 | Le résultat final du processus DLPCN[21] | 24 |
| 2.7 | Rayon de tolérancechintalapudi2003localized | 26 |
| 2.8 | Capteur de bordchintalapudi2003localized | 27 |
| 2.9 | Bord localisééchintalapudi2003localized | 27 |
| 2.10 | Les étapes de l'estimation des limites[19] | 28 |
| 2.11 | Illustration du cas continu[10] | 30 |
| 2.12 | Illustration du cas discret[10] | 30 |
| 3.1 | Champs exploitables dans WiFi | 43 |
| 3.2 | Champs exploitables dans ZigBee | 44 |
| 3.3 | La technique de la trilatération | 46 |
| 3.4 | Comparaison de l'énergie consommée | 53 |
| 3.5 | L'énergie consommée par le protocole LPCN | 54 |
| 3.6 | L'énergie consommée par l'algorithme proposé | 54 |
| 3.7 | Illustration de la durée de vie du réseau | 55 |
| 3.8 | Le pourcentage des noeuds utilisant le GPS selon la taille du réseau | 56 |
| 3.9 | Le pourcentage des noeuds utilisant le GPS selon le rayon de communication | 57 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Classification des protocoles de localisation | 38 |
| 2.2 | Comparaison des protocoles de localisation des noeuds frontières étudiés . . | 39 |
| 3.1 | Table des notations | 48 |
| 3.2 | Les paramètres de simulation | 50 |

Introduction générale

L'évolution technologique a permis aux chercheurs de résoudre les différentes problématiques rencontrées dans divers domaines de recherche. L'émergence des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ou Wireless Sensor Network (WSN) en anglais a influencé progressivement le monde technologique, pour cela les spécialistes se sont intéressés de plus en plus à cette branche de recherche où ils se sont basés sur le moyen d'adapter leurs solutions aux contraintes imposées par ce type de réseaux pour répondre aux besoins.

Les réseaux de capteurs sans fil sont généralement composés d'un ensemble de noeuds capteurs, déployés dans une zone géographique appelée zone de service ou zone d'intérêt dont le but est de surveiller l'environnement et collecter les données tel que la température, l'humidité puis les communiquer avec une liaison sans fil, un RCSF comporte aussi une ou plusieurs stations de base qui s'occupent des différents traitements effectués dans le réseau. Ce type de réseau est utilisé dans divers domaines et applications comme les applications militaires, celles concernant la santé, l'industrie, les villes intelligentes et bien d'autres applications. Notant que les capteurs possèdent des ressources limitées en mémoire et énergie, les chercheurs doivent prendre en compte cette contrainte vu que certaines applications sont gourmandes en termes de ressources. D'autres contraintes sont imposées et sont dûes au déploiement aléatoire des noeuds capteurs dans des réseaux à grande échelle, cela peut influencer l'emplacement des capteurs et donc la topologie du réseau, sachant que pour pouvoir surveiller la zone d'intérêt il faut toujours concevoir la topologie du réseau qui implique l'importance d'avoir connaissance des emplacements des noeuds, ces derniers peuvent se déplacer dans le réseau comme ils risquent d'être détruits à cause d'un événement naturel qui se produit dans la zone de service ce qui influence le fonctionnement du réseau, par conséquent il faut adapter les solutions proposées pour prendre en considération ces dommages et pouvoir les détecter à fin de garantir le bon fonctionnement du réseau. Pour que les noeuds capteurs puissent accomplir leurs tâches ils doivent avoir connaissance de leurs emplacements dans le réseau, la solution la plus utilisée pour cela c'est le GPS (Global Position System) qui est le système de géolocalisation le plus fréquent, cependant

cella influence sur les ressources énergétiques des noeuds capteurs, il est donc important de proposer des solutions qui permettent au noeuds de ce localiser tous en préservant leur énergies.

Le problème de l'emplacement des noeuds capteurs a fait pousser les chercheurs dans le domaine à aborder et détailler la localisation des noeuds capteurs dans les RCSFs, aussi ils se sont intéressés à la détection des évènements qui se produisent dans le réseau et qui influencent la topologie ainsi que la frontière du réseau, dont plusieurs travaux sont proposés dans la littératures concernant la localisation des noeuds et la détection des frontières dans les réseaux de capteurs sans fil. Généralement le problème de la détection de frontière englobe celui de la localisation des noeuds vu qu'il faut avoir connaissance de la position du noeud pour savoir s'il s'agit d'un noeud frontière ou pas. Pour cela la localisation présente un service majeurs qui permet de calculer ou bien d'estimer la position de chaque noeud capteur dans le réseau, comme la détection de la frontière permet de couvrir les évènements qui peuvent se reproduire, soit en détectant la frontière de la zone influencée par l'évènement prenons l'exemple d'un feu dans une forêt ou bien détecter la limite d'un trou causé dans le réseau par un obstacle quelconque.

Dans ce mémoire nous présentons notre contribution qui s'agit de l'amélioration du protocole LPCN pour la détection de la frontière d'un réseau de capteur sans fil dans lequel ils ont utilisé le GPS pour localiser les noeuds. Le but de notre contribution c'est de réduire le nombre de noeuds avec GPS en proposant une solution qui permet la localisation d'un noeud capteur sans avoir besoin de GPS, cela aura le bénéfice de minimiser la consommation d'énergie et donc prendre en considération la contrainte énergétique des réseaux de capteurs sans fil.

Notre travail est organisé en trois chapitre comme suit : Le chapitre (1) introduit le concept des réseaux de capteurs sans fil en détaillant leurs caractéristiques et expliquer leur architecture, puis nous allons s'initier au problème de la localisation dans les réseaux de capteurs sans fil celui que nous allons aborder dans la suite de notre mémoire. Dans le chapitre (2) nous allons présenté une étude de quelques travaux dans la littérature concernant le concept de la localisation et la détection des frontière dans les RCSFs, puis nous allons les classifier en deux approches et faire une comparaison entre l'ensemble des travaux étudiés selon plusieurs critères tel que la consommation d'énergie et l'utilisation du GPS. Dans le chapitre (3), nous allons aborder notre proposition en détaillant les phases de la solution et décrire l'algorithme proposé, puis présenter et discuter les résultats des simulations faite avec l'environnement de programmation MATLAB et nous terminons avec une conclusion générale.

Généralités sur les RCSF

1.1 Introduction

Le développement technologique a permis une grande évolution dans le monde de la communication à travers les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ou en anglais (WSN) pour Wireless Sensor Networks. Dans ce chapitre nous allons présenter les réseaux des noeuds capteurs sans fil, leurs caractéristiques et limites, leurs composants et plus précisément l'architecture des capteurs ainsi que l'architecture fonctionnelle des RCSFs et leurs différents domaines d'application, par la suite nous allons s'initier à la localisation dans les réseaux de capteurs sans fil qui sera la branche étudiée dans les chapitres qui suivent.

1.2 Présentation des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) présentent l'une des nouvelles technologies qui joue un rôle majeur dans le milieu des réseaux, dans cette section nous allons aborder le concepts des RCSFs et décrire en détailles l'architecture d'un noeud capteur ainsi que son principe de fonctionnement.

1.2.1 Définition d'un RCSF

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est un cas particulier des réseaux Ad-hoc [9] qui sont des réseaux informatiques permettant de connecter plusieurs noeuds appelés capteurs dans le contexte des RCSF, par des liaisons sans fil [4]. Les noeuds capteurs sont déployés arbitrairement dans le but de collecter des données (température, signal, mouvement...) et de les transmettre [9] via une communication sans fil. Les informations captées dans la zone d'intérêt sont accessibles pour l'utilisateur à l'aide d'un noeud spécifique appelé

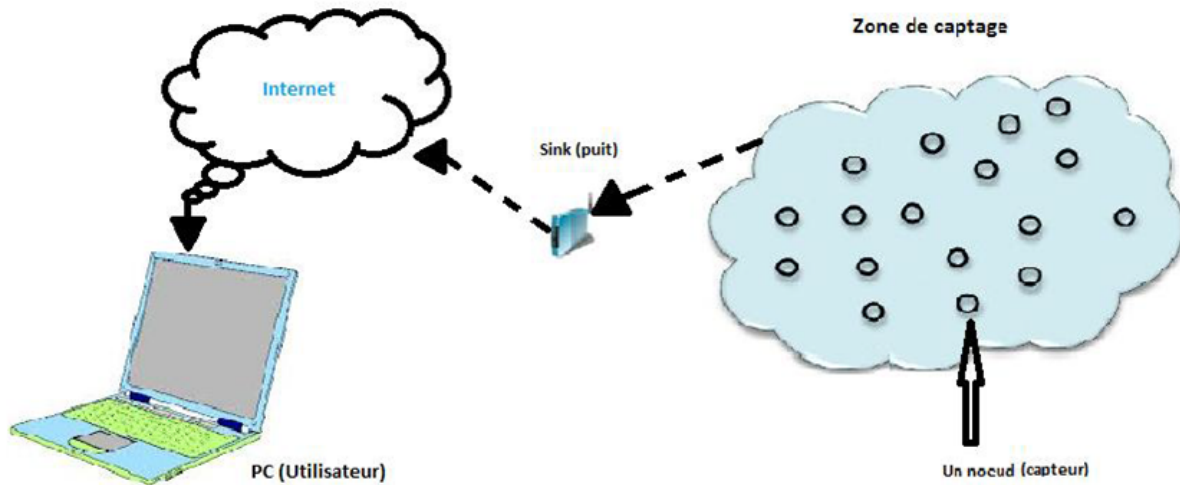


FIGURE 1.1 – Architecture d'un RCSF [2]

noeud puit (sink) comme illustré dans la figure 1.1 [2].

1.2.2 Définition d'un noeud capteur

Un noeud capteur est un dispositif électronique de taille réduite alimenté de ressources énergétiques limitées et autonomes [2], les capteurs peuvent surveiller les zones d'intérêt, formant ainsi un réseau de capteurs [4], ils peuvent détecter les différents changements environnementaux par la détection et l'acquisition de données sur leurs environnements [9], puis les signaler à un centre de contrôle via une station de base.

1.2.3 Architecture d'un noeud capteur

Un noeud capteur est composée principalement de quatre unités qui lui permettent d'évaluer les évènements détectés dans sa zone d'intérêt, ces unités sont comme suit [4] : unité d'acquisition qui comporte le capteur et le convertisseur analogique-numérique , unité de traitement qui englobe le processeur et la mémoire, unité de communication qui contient le dispositif radio et unité d'alimentation qui représente la batterie du noeud capteur. La figure 1.2 [2] illustre l'architecture d'un noeud capteur que nous allons détailler par la suite unité par unité.

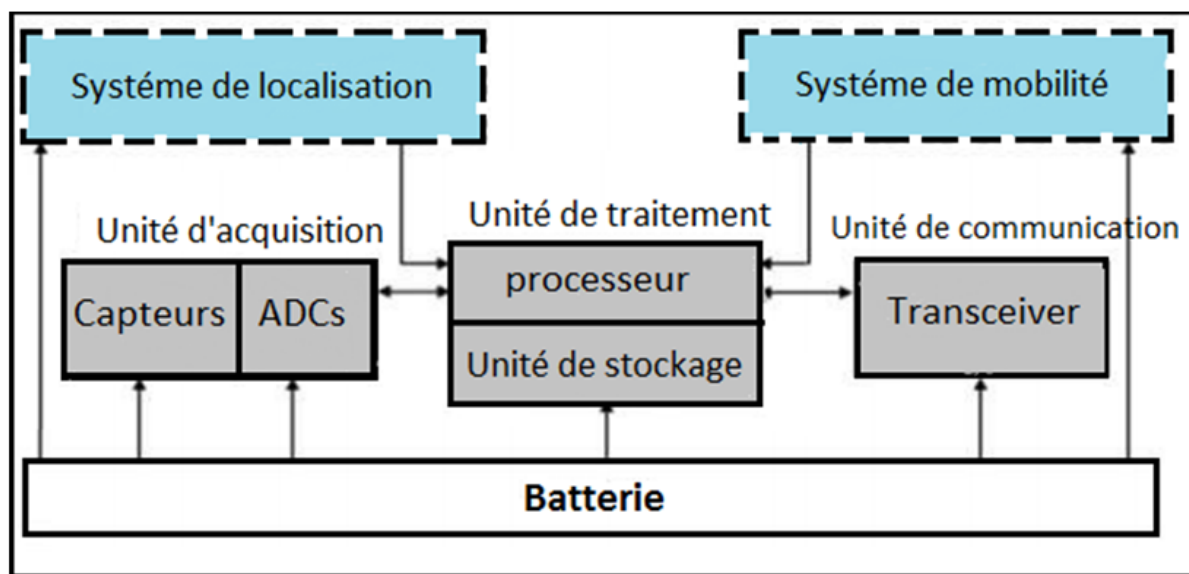


FIGURE 1.2 – Architecture matérielle d'un noeud capteur [2]

1.2.3.1 Unité d'acquisition

L'unité d'acquisition dite aussi unité de captage est chargée de capter des mesures sur les paramètres environnementaux dans la zone de surveillance du noeud capteur, puis les transformer en signaux numériques compréhensibles par l'unité de traitement. Cette unité est composée de deux sous-unités qui sont :

1. **Le capteur** : qui permet d'obtenir une mesure sur des paramètres environnementaux, puis les transformer en signaux analogiques.
2. **convertisseur analogique-numérique (ADC)** : pour Analog to Digital Converter en anglais, convertit les signaux analogiques en signaux numériques puis les transmettent à l'unité de traitement.

1.2.3.2 Unité de traitement

C'est l'unité de base dans l'architecture du noeud capteur, elle permet de contrôler le bon fonctionnement des autres unités. Elle comporte deux interfaces : une avec l'unité d'acquisition et l'autre avec l'unité de communication. Cette unité comporte les deux éléments suivants :

1. **Le processeur** : chargé de traiter les données et contrôler les procédures de collaboration du noeud capteur avec les autres noeuds dans le but de réaliser différentes

taches, il est généralement associé à une unité de stockage.

2. **La mémoire** : représente une unité de stockage qui permet de stocker les données collectées pour les traiter ensuite par le microprocesseur.

1.2.3.3 Unité de communication

Cette unité est chargée d'assurer la communication entre les noeuds capteurs composant le réseau en se basant sur le principe émetteur/récepteur, elle intègre un dispositif radio qui permet de garantir l'émission et la réception des données entre les noeuds via une communication sans fil.

1.2.3.4 Unité d'alimentation

La batterie est un composant majeur d'un noeud capteur, elle assure le fonctionnement des autres unités en les alimentant de l'énergie. Généralement la capacité d'énergie d'une batterie est limitée ainsi que cette dernière n'est pas rechargeable et non plus remplaçable, ce qui impose la contrainte énergétique dans les réseaux capteurs sans fil.

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autre composant à savoir le système de localisation GPS (Global Position System) [2].

1.3 Caractéristiques des RCSFs

Pour assurer le bon fonctionnement d'un réseau de capteur, il faut tenir compte d'un certain nombre de caractéristiques tel que :

- Les RCSFs présentent une architecture décentralisée et arbitraire. [9]
- Les noeuds capteurs sont des dispositifs de petite taille. [4]
- Les capteurs sont susceptibles de tomber en panne. [4]
- La topologie du réseau change à cause de la mobilité et la défaillance des noeuds, les obstacles environnementaux. [4]
- Adaptabilité : D'où l'intérêt d'avoir un très grand nombre de noeuds, on cherche toujours à avoir une meilleure surveillance en cas de défaillance. [2]
- Réseau multi-saut : Les RCSFs utilisent des communications multi-saut à cause de la limitation des ressources physiques.
- Réduction de la consommation d'énergie : l'énergie au sein d'un RCSF est limitée car les capteurs sont alimentés par des batteries qui ne peuvent pas être rechargées ou remplacées.

- Différents types de déploiement : génère des conséquences qui sont différents d'un déploiement à un autre tel que l'absence de sécurité. [2]

1.4 Contraintes et limites des RCSFs

La conception des réseaux de capteurs sans fils ainsi que le développement des protocoles utilisés dans le domaines des RCSFs dépend de plusieurs contraintes :

1. **Contrainte énergétique** : La gestion de l'énergie au sien des RCSFs [2] présente une contrainte majeure vu que les noeuds capteurs sont alimentés par des batteries qui ne peuvent pas être rechargées ou remplacées, ceux qui les rend limités en terme de quantité d'énergie, d'où l'importance de la réduction de la consommation d'énergie.
2. **Qualité de services** : Il faut bien penser à garantir une bonne qualité de services afin d'assurer une communication efficace entre les noeuds capteurs, généralement ceci consiste à réduire le délai de réception des paquets[9] au niveau de la zone d'intérêt.
3. **Mode de transmission** : Il présente un facteur important dans le déploiement des RCSFs, les noeuds peuvent transmettre les données en utilisant une seule fréquence ou plusieurs fréquences. [9]
4. **La mobilité des noeuds** : Les noeuds capteurs au sein du réseau peuvent être statiques ou mobiles, la mobilité est une contrainte très importante vu qu'elle peut causer un changement de la topologie du réseau.
5. **Durée de vie du réseau** : C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier noeud s'épuise [3], et donc la contrainte énergétique a une influence sur la durée de vie du réseau qui peut varier entre quelques heures et plusieurs années.
6. **Ressources limitées** : En plus de l'énergie qui est limitée, les noeuds capteurs possèdent une mémoire limitée ainsi qu'une capacité de traitement et une bande passante limitée aussi, ceci est le défi majeur devant les concepteurs des RCSFs.
7. **Passage à l'échelle** : Généralement dans les RCSFs le nombre de noeuds déployés dépend de l'application, à savoir que des applications peuvent atteindre des milliers de noeuds, ce qui nécessite une densité très grande pour assurer le bon fonctionnement du réseau.

8. **Tolérance aux pannes** : Diverses pannes peuvent se reproduire dans le réseaux à cause des évènements accidentels, des pannes matériels ou des bugs (pannes conceptuelles), pour cela il est intéressant d'implémenter un système qui permet de surveiller le réseau à tous moment afin de produire un bon service même à la présence de pannes, ceci est le principe de base de la tolérance aux pannes.
9. **Topologie dynamique** : Les noeuds capteurs sont déployés arbitrairement dans le réseau, ce qui engendre différentes topologies qui ont un aspect dynamique, cet aspect est dû à la mobilité et la défaillance des noeuds, les évènements environnementaux, la destruction des noeuds ou l'épuisement de leurs ressources d'énergie.
10. **Homogénéité et Hétérogénéité du RCSF** : Selon les noeuds composants le réseau, ce dernier peut être en deux types : réseaux hétérogènes où les noeuds ont des caractéristiques distinctes (rayon de capture, capacité de traitement, porté de transmission...) et réseaux homogènes où tous les noeuds capteurs sont homogènes en terme de caractéristiques matériels et logiciels.

1.5 Architecture de communication des RCSFs

Un réseau de capteur sans fil est généralement composé d'un ensemble de noeuds dans une zone géographique appelée zone d'intérêt ou zone de couverture, chacun de ces noeuds a la possibilité de recueillir les données et les router vers un ou plusieurs noeuds particulier appelé station de base ou puits pour Sink en anglais. Les noeuds sont déployés aléatoirement dans la zone d'intérêt, sachant qu'il existe plusieurs types de capteurs, ces derniers ont le but de mesurer les données relatives à leur zone de couverture en cas d'évènement ou de phénomène apparu dans la zone, puis les acheminer via une communication sans fil vers la ou les stations de base. Le noeud puit collecte ensuite ces données et les envois vers le noeud gestionnaire de tâches à travers d'autres réseaux tels que l'internet ou à travers des satellites. Les données collectées peuvent être récupérées à distances par les utilisateurs, par un simple accès à ce noeud gestionnaire de tâches [4] qui a pour rôle de station de traitement de données. La figure 1.3 résume l'architecture de communication d'un RCSF.

1.5.1 La pile protocolaire dans un RCSF

La communication entre les noeuds capteurs dans le RCSF est représentée par une série de connexions contrôlées par plusieurs protocoles, ces derniers sont organisés sous forme ce qu'on appelle pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que par les autres

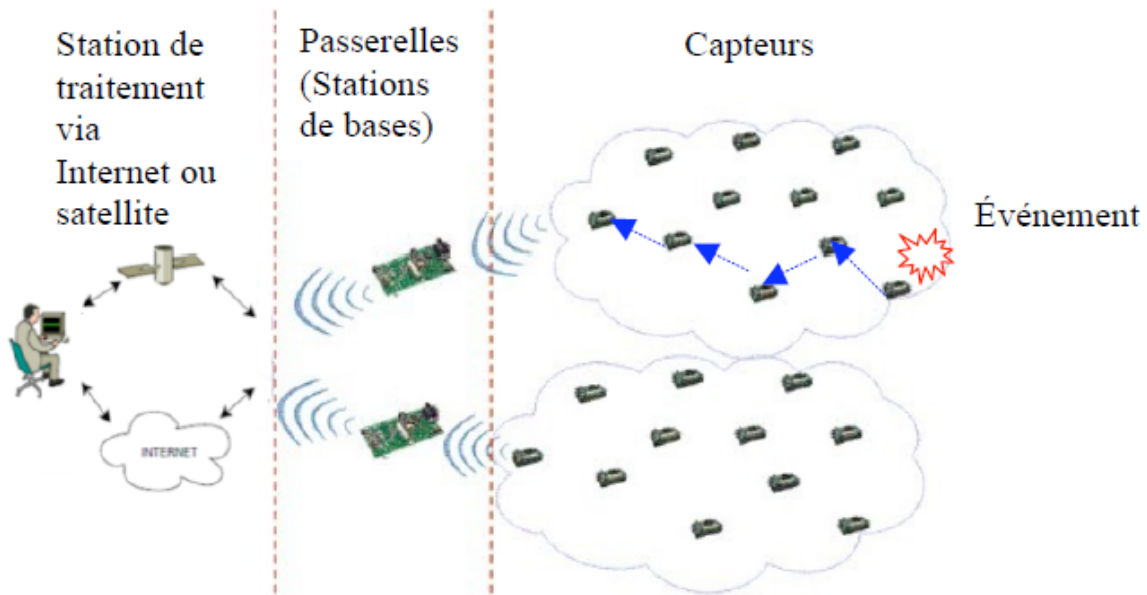


FIGURE 1.3 – Architecture de communication d'un RCSF [4]

noeuds capteurs composant le réseau, la figure 1.4 illustre la pile protocolaire d'un RCSF.

Cette pile protocolaire comporte cinq couches (physique, liaison données, réseaux, transport et application) et trois plans (gestion de l'énergie, gestion de la mobilité et gestion de taches).[4] [3]

- **Couche physique** : cette couche s'occupe des techniques d'émission et de réception de données entre les noeuds capteurs.
- **Couche liaison de données** : vu les caractéristiques de l'environnement du réseau de capteurs tel que la mobilité des noeuds, cette couche doit assurer de minimiser le taux de collision entre les données diffusées par des noeuds voisins.
- **Couche réseaux** : elle s'occupe du routage des données fournies par la couche transport.
- **Couche transport** : permet de maintenir les flux de données en cas de connexion via internet.
- **Couche application** : selon les fonctionnalités des noeuds capteurs, diverses applications peuvent être utilisées au niveau de cette couche.
- **Plan de gestion de l'énergie** : permet au noeuds capteurs de bien gérer leurs ressources d'énergie pour une longue durée.
- **Plan de gestion de la mobilité** : permet de détecter les mouvements des noeuds

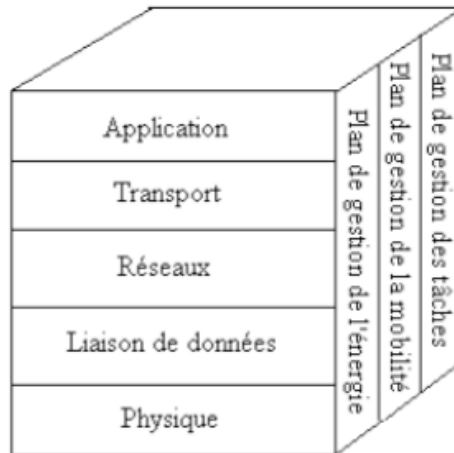


FIGURE 1.4 – Pile protocolaire d’un RCSF [4]

capteurs et de sauvegarder leurs emplacements.

- **Plan de gestion de tâches** : permet d’assurer l’ordonnancement entre les nœuds capteurs suivant leurs domaines d’application.

1.6 Domaines d’application des RCSFs

Les RCSFs présentent une nouvelle technologie utilisée de plus en plus dans plusieurs champs d’application, leur avantage par rapport aux réseaux classiques c’est qu’ils peuvent être utilisés dans beaucoup d’environnements par conséquent leurs applications accroissent de plus en plus, parmi elles nous citons :

1.6.1 Applications militaires

Les réseaux de capteurs sans fil étaient utilisés dès le départ dans le domaine militaire grâce à leurs caractéristiques telles que la tolérance aux pannes et l’auto organisation [6]. Les réseaux de capteurs proposent de nombreux avantages à savoir le contrôle des équipements, la communication peu coûteuse entre les unités, la reconnaissance et la surveillance d’un champ de bataille ainsi qu’une estimation très rapide et évolutive des dégâts encourus en temps de crise.[2]

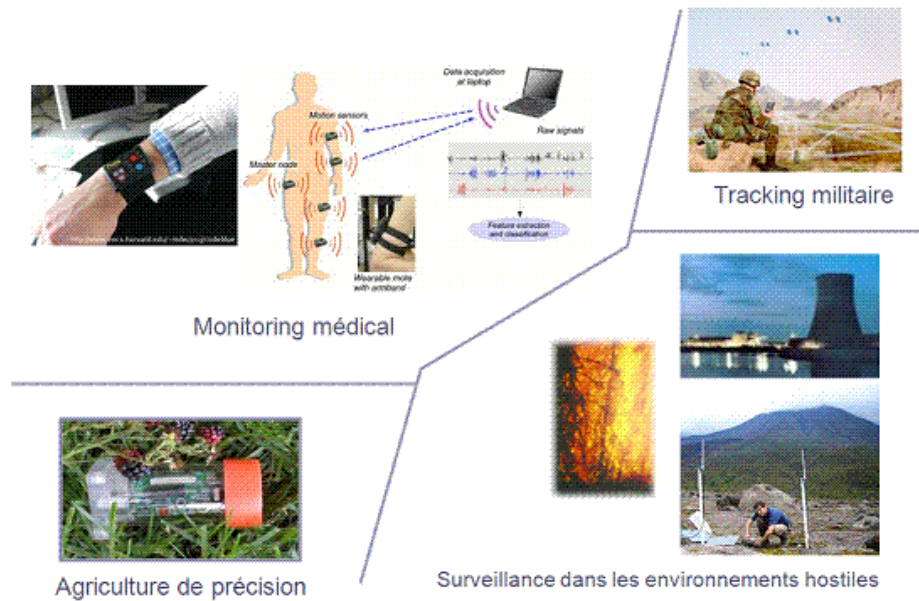


FIGURE 1.5 – Applications des RCSFs

1.6.2 Applications environnementales

Les réseaux de capteurs sans fil nous permettent d'intervenir plus rapidement et plus efficacement dans les problèmes environnementaux tels que les inondations, les incendies, la pollution...etc. ils permettent même d'améliorer la connaissance de l'environnement ainsi que l'efficacité des moyens de lutte[4]. D'une façon générale les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés dans plusieurs applications environnementales tel que la détection et l'évaluation de l'indice de la pollution dans les milieux urbains, la surveillance des flux migratoires d'oiseaux ou la surveillance des espèces d'animaux en voie de disparition...etc. [6]

1.6.3 Applications médicales

La recherche sur des capteurs intelligents dans le domaine médicale inclut les moyens d'hospitalisation à domicile et comme les capteurs sont de taille réduite ils peuvent être utilisés et implantés sous la peau ou déployés sur le corps de l'être humain [6], cette application permet une surveillance permanente pour les patients et propose un suivi de traitement à distance. Comme ceci permet le diagnostic de plusieurs maladies, aussi des micro capteurs dotés de caméra permettent de transmettre des images de l'intérieur du corps humain sans faire recours à la chirurgie. [3]

1.6.4 Applications industrielles

Dans ce contexte, les réseaux de capteur sans fil peuvent être utilisés dans plusieurs situations, leurs objectifs principaux sont le suivi des chaînes de production, la gestion d'inventaire et le contrôle de qualité [2]. Ces applications permettent de maîtriser le processus de production et d'améliorer la qualité de services des entreprises tout en assurant la réduction des coûts.[6]

1.6.5 Applications de la sécurité

Les réseaux de capteurs sans fil interviennent dans le domaine de sécurité dans diverses applications à savoir le suivis de certaines institutions en temps réel [4] dans le but de prévenir les vols et les incendies, aussi les applications de surveillance des routes et des voies ferrées pour la détection des accidents et d'autres incendies qui peuvent arriver.

1.6.6 Les villes intelligentes

Grâce aux réseaux de capteurs, la vie quotidienne peut être améliorée de mieux à l'aide des différentes applications qui fournissent des services aux habitants. Ceci est assuré par l'intégration de divers capteurs dans plusieurs domaines qui permettent de collecter des données au sein d'une ville [6], à savoir dans le domaine de transport, l'internet des objets...etc. Les technologies de l'information et de communication (TIC) présentent une partie majeure dans le concept des villes intelligentes, ceci fait appelle au RCSF en utilisant des dispositifs connectés pour offrir des services urbains.

1.6.7 Autre applications additionnelles

De nombreuses d'autres applications des RCSF sont mises en place dans différents domaines à savoir : l'agriculture, le transport, le contrôle de construction, surveillance des habitats...etc

1.7 La localisation dans les RCSFs

Diverses applications des réseaux de capteurs sans fil nécessitent l'information sur l'emplacement des noeuds capteurs, ce qui a permis au service de la localisation de prendre une grande importance dans le domaine des RCSFs. Après le déploiement du réseau, la localisation sera la première tâche exécutée par les noeuds capteurs [6] pour déterminer

leurs positions dans le réseau. Dans cette section nous allons présenter quelques contraintes qui peuvent poser des problématiques sur la localisation et par la suite nous allons décrire les techniques de localisation à savoir celle de l'estimation des coordonnées et celle de mesure des distances avec les différentes technologies utilisées actuellement dans le monde des RCSFs.

1.7.1 Les contraintes de la localisation :

l'ensemble des travaux qui s'intéressent à la localisation dans les réseaux de capteurs sans fil doivent proposer des solutions qui répondent aux défis rencontrés et aux contraintes imposées, dont nous citons les suivantes :

- **L'auto organisation** : L'un des obstacles imposés c'est l'absence d'un système de positionnement, les noeuds se positionnent aléatoirement néanmoins c'est très coûteux d'équiper chaque capteur par un GPS, ce qui rend nécessaire que les algorithmes proposés dans ce contexte doivent répondre aux différentes situations qui peuvent arriver tel que la destruction des noeuds capteurs.
- **Contrainte de ressources** : Les noeuds capteurs utilisent généralement des ressources limitées à titre d'exemple les ressources énergétiques, ce qui nécessite que la solution soit simple et moins coûteuse.
- **L'emplacement des ancres** : Les noeuds ancres sont des noeuds capteurs qui ont connaissance de leurs emplacements dans le réseau, possèdent un rôle très important dans la localisation des noeuds, donc il faut les déployer de façon à couvrir la maximum du réseau à fin de permettre la localisation d'un maximum nombre de noeuds capteurs.
- **La robustesse** : Les algorithmes de localisation doivent être robustes et tolérants aux différents problèmes qui peuvent influencer sur l'exactitude de la localisation des noeuds au niveau du réseau.

1.7.2 Les techniques de la localisation

Dans cette section, nous allons présenter les différentes techniques de localisation à savoir : les méthodes d'estimation de coordonnées ainsi que les techniques et les technologies de mesures utilisées dans la localisation.

1.7.2.1 Techniques d'estimation des coordonnées

Les techniques suivantes permettent à un noeud capteur de calculer sa position définitive en fonction des données et informations qu'il possède sur les distances avec ces voisins, les angles et les positions d'ancres, on distingue trois méthodes :

1. **Triangulation** : Permet de définir la position d'un noeud capteur en fonction de l'angle formé avec les références qu'il possède dont on connaît les positions, cette technique engendre un surcoût vu qu'elle nécessite l'utilisation des équipements de plus pour la mesure d'angle.[6]
2. **Trilatération** : Cette technique se base sur la connaissance des distances séparants le noeud capteur des différents noeuds ancres (noeuds références), la position est calculée par l'intersection des trois cercles formés respectivement par les noeuds références.[6]
3. **Multilatération** : Les deux techniques précédentes sont intéressantes dans le cas où le degré de connectivité du noeud capteur atteint ou soit supérieur à 3, cependant dans un réseau où les noeuds sont déployés aléatoirement tel qu'un réseau clairsemé il est peu probable que tous les noeuds aient suffisamment de références. Le principe repose sur un ou deux voisins référencés (noeuds ancres par exemples), il peut y avoir plusieurs positions possibles pour un noeud capteur et en se basant sur un ensemble d'informations à savoir la distances entre les noeud capteur et ces voisins et le rayon de communication, on pourra déterminer la position exacte du noeud en question.[4]

1.7.2.2 Les techniques de mesures

dans ce qui ce suit nous présentons quelques techniques d'estimation de distance entre deux noeuds capteurs [6] :

1. **Temps d'arrivée TOA (Time Of Arrival)** : C'est la technique utilisée par les systèmes GPS, elle exploite la relation entre la distance et le temps d'arrivée et elle a besoin d'une forte synchronisation (temps de traitement du signal identique [2]) et nécessite l'utilisation des horloges internes[6]. Elle permet à un capteur récepteur de déduire la distance qui le sépare du capteur émetteur en calculant la différence des dates d'émissions et de réceptions, puis soustraire le temps de traitement du signal reçus et après diviser le résultat obtenu par deux.[2]
2. **Différence de temps d'arrivée TDOA (Time Difference Of Arival)** : Cette technique consiste à mesurer la distance qui sépare deux noeuds en exploitant le temps de parcours du signal entre ces deux noeuds capteurs [6]. Pour cela il faut y

avoir l'émission de deux signaux de différente nature avec des vitesses de propagation différentes qui sont supposées être connues, à savoir que cette technique résulte de la différence des dates d'arrivée des signaux émis[2]. Néanmoins chaque noeud doit avoir une antenne pour chaque signal et un horloge .A la réception de chaque signale le noeud récepteur sauvegarde les moments d'arrivée de chaque signal et calcule la distance parcourue [6] en utilisant l'équation : $t = (V_r - V_s).(t_s - t_r - t_d)$

3. **Indicateur de puissance de signal reçu RSSI (Received Signal Strength Indication)** : Dans cette technique la distance entre un noeud capteur émetteur et un noeud capteur récepteur est mesurée en utilisant la puissance de signal reçu, en plus elle permet de fournir une indication sur l'intensité du signale reçu [6][2].
4. **Angle d'arrivée AOA (Angle Of Arrival)** : C'est une technique utilisée pour mesurer l'angle d'arrivée d'un signal au niveau d'un noeud capteur [6], d'autre façon elle permet de calculer l'angle formé par les deux capteurs émetteur et récepteur [2], elle nécessite d'avoir des antennes permettant de calculer les moments l'arrivée d'un signal[6] et de cette façon en utilisant cette information nous pouvons calculer l'angle d'arrivée.
5. **Nombre de sauts (hop count)** : Cette technique permet au noeuds capteurs de se localiser en utilisant seulement l'information de la connectivité dans le réseau, tel que ce dernier est représenté par un graphe [6].

1.7.2.3 Les technologies de mesure

Les techniques citées auparavant peuvent être basées sur diverses technologies parmi elles nous citons les suivantes qui sont les plus utilisées :

1. **Infrarouge** : Signifie un rayonnement électromagnétique de même nature que la lumière visible. Ses longueurs d'ondes sont trop petites pour être perceptibles par l'œil humain, comprises entre 700 nm et 1 mm. Cette méthode est plus adaptée au système de positionnement à l'intérieur où l'intensité de la lumière reçue est utilisée pour mesurer la distance entre l'émetteur et le récepteur.[6]
2. **L'ultrason** : Présente une onde mécanique et élastique, qui se propage à travers des supports fluides, solides, gazeux ou liquides. La gamme de fréquences des ultrasons se situe entre 16000 et 10000000 Hertz, trop élevées pour être perçues par l'oreille humaine. L'avantage de ce système est qu'il offre une solution peu coûteuse mai d'autre part n'est pas adaptée au langues distances.[6]

3. **Global Positioning System (GPS)** : C'est un système de géolocalisation par satellites développé par l'armée américaine et il est mis à disposition des civils. Il permet de déterminer les coordonnées géographiques de n'importe quel point situé à la surface du globe. Les dispositifs peuvent calculer leurs positions en exploitant la trilatération des signaux électromagnétiques synchronisés émis par les satellites. Il comporte en général 24 satellites avec un débit de réception de 50 bits par seconde pour chacun d'eux. [6]
4. **Bluetooth** : Est une technologie de réseaux sans fil d'une faible portée permettant de relier des appareils entre eux sans liaison filaire. Contrairement à la technologie IrDa (liaison infrarouge), les appareils Bluetooth ne nécessitent pas d'une ligne de vue directe pour communiquer, ce qui rend plus souple son utilisation et permet notamment une communication d'une pièce à une autre, son principe avantage est qu'est peu coûteuse en énergie.
5. **Radio frequency identification(RFID)** : C'est une méthode utilisée pour mémoriser et récupérer des données à distance ou d'identifier un objet et d'en suivre le cheminement tout en reconnaissant ses caractéristiques à distance grâce à une étiquette appelée "radio-étiquette". Cette dernière émet des ondes radio, son avantage est qu'elle peut être utilisée sur de grande surface.

1.8 Conclusion

Le développement des réseaux de capteurs sans fil a permis de prendre un rôle majeur dans diverses applications, néanmoins ces dernières présentent des contraintes et des problématiques qui doivent être prises en compte. Les notions que nous avons abordé dans ce chapitre permettent de comprendre le principe des RCSFs et donc donner la possibilité de proposer des solutions pour les problématiques posées tel que le problème de la localisation au quel nous intéressons dans le reste de notre travail. Dans le chapitre suivant nous allons étudier quelques travaux dans la littérature qui ont abordé la localisation des noeuds et la détection des frontières dans les réseaux de capteurs sans fil.

État de l'art

2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de quelques protocoles proposés dans la littérature et qui traitent de la problématique abordée. Dans la section 2.3, nous proposons une classification d'un ensemble de protocoles de localisation des noeuds frontières dans les réseaux de capteurs sans fil. La section 2.2 décrit l'ensemble des protocoles que nous avons étudiés.

2.2 Taxonomie des protocoles existants

Dans [14], les auteurs ont abordé la détection des limites dans les réseaux de capteurs sans fil. Ils ont proposé une classification selon plusieurs approches, à savoir (1) l'approche géométrique, (2) l'approche topologique et enfin (3) l'approche statistique.

- Les algorithmes appartenant à l'approche géométrique supposent que les positions des noeuds sont connues au préalable. Elles sont obtenues en utilisant un système de géolocalisation tel que le GPS. Ce dernier consomme beaucoup d'énergie et par conséquent influence sur la durée de vie du réseau.
- Les algorithmes qui appartiennent à l'approche statistique sont fondés sur des fonctions statistiques et des formules mathématiques, ce qui facilite les calculs.
- L'approche topologique utilise les informations de connectivité entre les noeuds capteurs et elle ne dépend pas de leur répartition. Elle évite l'utilisation du GPS, ce qui minimise la consommation d'énergie. Généralement le réseau est représenté sous forme d'un graphe et utilise un arbre de parcours. la plupart des solutions proposées dans cette catégorie d'approche utilisent la notion de niveau en formant des

ensembles de noeuds capteurs.

La solution proposée dans ce travail permet à chaque noeud capteur de s'auto-localiser par rapport aux limites du réseau, elle comprend trois phases :

1. *La phase de la collecte des informations* : Chaque noeud ϑ_i détermine la liste de ses voisins à n -sauts suivant un processus récursif bien défini.
2. *La phase de la construction du chemin* : Qui est illustrée dans la figure 2.1 [14], où un chemin de communication sera construit autour de chaque noeud capteur ϑ_i . Pour cela, il faut identifier les liens de connectivité entre les noeuds capteurs voisins au même noeud ϑ_i . L'ensemble des noeuds capteurs appartenant au voisinage direct du noeud capteur ϑ_i est appelé premier ensemble de ϑ_i . L'algorithme effectue par la suite une recherche des noeuds en expansion parmi ceux du premier ensemble. Cette procédure récursive continue jusqu'à ce qu'aucune expansion n'est possible.
3. *La phase de vérification du chemin* : Durant cette phase, l'algorithme examine les chemins construits pendant la phase précédente afin de détecter déterminer les positions des noeuds capteurs dans le réseau. Le premier ensemble et le dernier ensemble sont utilisés pour déterminer la position des noeuds capteurs tel que l'algorithme procède à la vérification de chaque paire de noeuds appartenant à l'un des deux ensembles aurait au moins un voisin en commun. Si ce dernier existe, alors le chemin est fermé et le noeud capteur est un noeud interne sinon, le chemin est cassé et le noeud capteur en question sera un noeud limite.

L'avantage de cette solution est qu'elle est peu coûteuse en énergie. Néanmoins, elle présente des inconvénients notamment l'existence des noeuds non vérifiés, une complexité importante lors de l'exécution de l'algorithme ainsi que le problème de mémoire.

Dans [11] les auteurs ont abordé le problème de la détection des trous dans les réseaux de capteurs sans fils. Vu que les noeuds ne connaissent pas leurs emplacement géométrique au niveau du réseau, ils ont pensé d'utiliser les informations de géométrie qui sont cachées dans la structure de connectivité des noeuds dans le réseau pour identifier les caractéristiques topologiques du réseau. La communication dans le réseau est représentée par un graphe, les arrêtes entre les noeuds représentent les liens de communication tel que cette dernière peut être interrompue ce qui fait apparaître des trous au niveau du réseau.

Le principe de l'algorithme consiste à sélectionner un ensemble de noeuds pour former un iso-niveau pour chaque noeud choisit au hasard au niveau du réseau, les noeuds composants l'iso-niveau forment un sous graphe dans lequel l'algorithme détermine les distances de sauts dans un périmètre donné, puis examine l'iso-niveau s'il forme un cercle fermé ou bien éclaté/cassé afin de détecter les trous existants et les noeuds qui sont au limites de

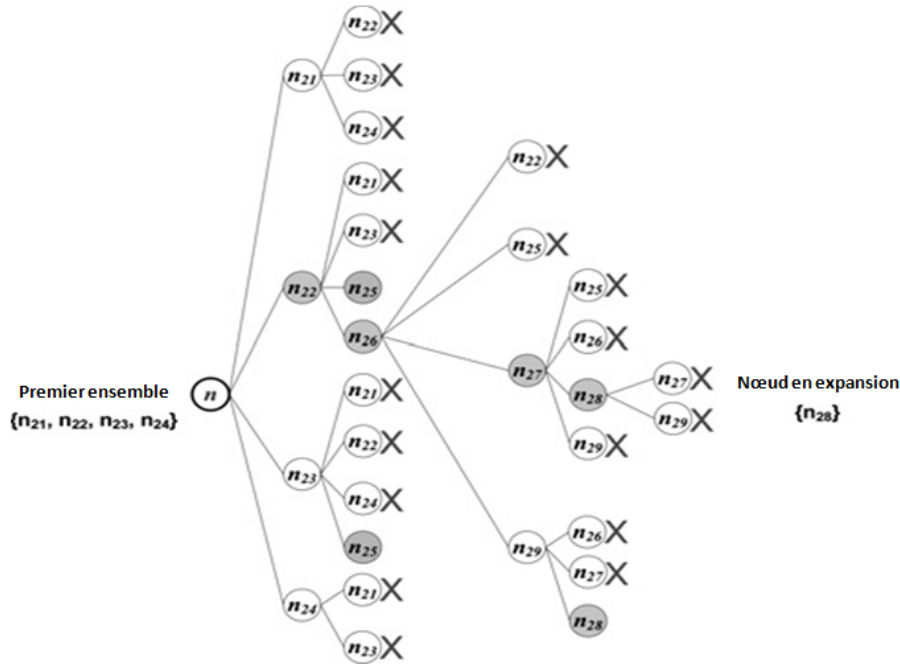


FIGURE 2.1 – La phase de la construction du chemin [14]

ces trous, la figure 2.2 [11] présente un exemple du résultat obtenu après l'exécution de l'algorithme. La vérification de l'iso-niveau est faite par un calcul répétilif du plus court chemin dans le sous graphe formé par les noeuds du même iso-niveau. Elle est assurée comme suit :

- Sélectionner un noeud arbitraire n_1 au hasard dans le sous graphe
- Définir un noeud n_2 plus éloigné du noeud arbitraire toujours dans le sous graphe correspondant à l'iso-niveau
- Calculer la distance du plus court chemin entre les deux noeuds et définir un noeud n du plus court chemin
- Supprimer tous les noeuds dans le quartier à deux sauts de n , si y a toujours un chemin entre n_1 et n_2 alors l'iso-niveau a une forme circulaire et aucun noeud ne sera marqué comme étant proche de la limite ; sinon calculer la distance de n_2 à un noeud plus éloigné de lui n_3 et effectuer le même contrôle de connectivité. L'absence du chemin implique que l'iso-niveau est cassé avec n_2 et n_3 seront marqués près d'une limite.

La solution proposée dans ce travail présente l'avantage qu'elle est peu coûteuse en énergie, mais elle a des inconvénients à savoir l'utilisation d'un processus répétilif pour le

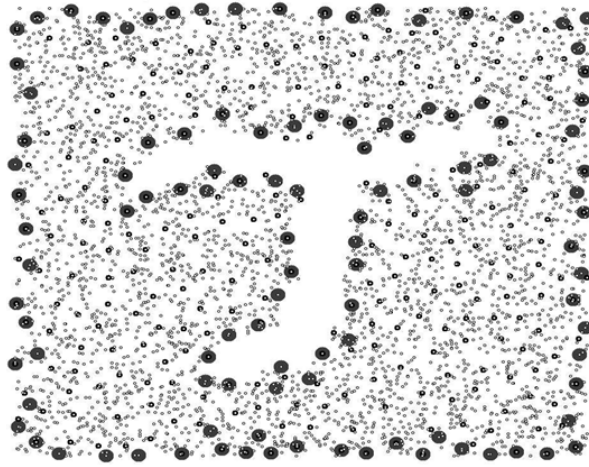


FIGURE 2.2 – La frontière d'un trou et les noeuds à sa limite [11]

calcule ce qui engendre une complexité plus élevée, la possibilité d'avoir des noeuds non visités et aussi le problème de degré de connectivité qui oblige un réseau plus dense.

Dans [22] la solution se base sur l'approche géométrique dont laquelle l'algorithme détecte les limites géographiques des trous dans le réseau, supposant uniquement les informations correspondantes au voisins à deux sauts. La solution propose un algorithme distribué qui adopte une approche locale et ne vérifie pas si les noeuds forment une boucle polygonale fermée, juste il détecte les noeuds sur les limites des trous tel qu'un trou est d'un simple polygone.

Dans cet article l'auteur a basé sur la théorie des graphes pour définir la notion de trou, tel que cette définition consiste à trouver des voies sans accord vu que cette dernière dans la théorie des graphes signifie une arête reliant deux sommets ou bien deux noeuds dans le concept des réseaux comme dans notre cas. La détection des cycles sans accords bien dit trous selon l'auteur est bien simplifiée s'il y aura un arrangement topologique des noeuds avec leurs informations géométriques, cet arrangement topologique consiste à connaître la relative orientation horaire *CCW* (ordres de ses bords incidents) de tous les voisins immédiats d'un noeud, cette dernière sur laquelle ce base l'algorithme proposé dans la solution afin d'obtenir le graphe géométrique des trous.

Comme avantage cette solution est simple et facile en terme de calculs, mais elle est coûteuse en énergie et utilise un mécanisme locale pour trouver les coordonnées de chaque noeud ce qui augmente la complexité.

Dans [5] l'auteur a proposé une nouvelle méthode pour déterminer si un polygone est intérieur ou extérieur. Si le polygone est intérieur il est possible qu'il représente un vide

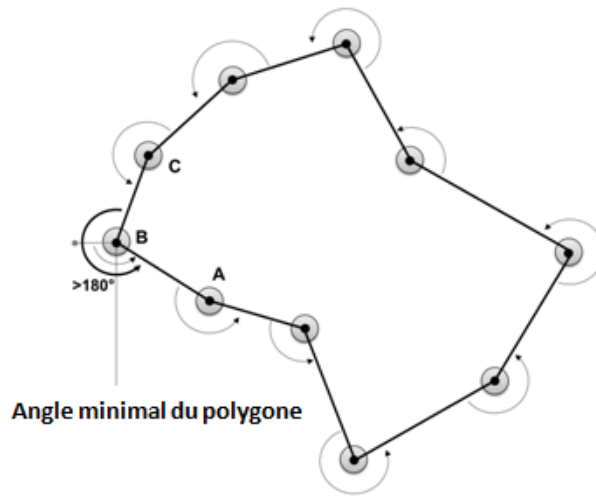


FIGURE 2.3 – Illustration d'un polygone extérieur[5]

ou un écart (un vide est basé sur la zone délimitée par un ensemble de noeuds de capteur, si cette zone est supérieur à un seuil donné, il sera considéré comme lacune). Pour cela ils ont proposé une algorithme basé sur l'algorithme DLPCN présenté dans [21] en rajoutant le code permettant de déterminer la nature du polygone trouvé intérieur (figure 2.4 [5]) ou extérieur (figure 2.5 [5]).

Dans [21] les auteurs présentent l'algorithme D-LPCN pour la détection des noeuds frontières, cet algorithme est la version distribuée de l'algorithme LPCN qui lui aussi permet de détecter les noeuds limites. Le principe de l'algorithme consiste à trouver un ensemble minimal de noeuds limites connectés présentant la frontière du réseau, le but de la minimisation c'est de réduire le temps de communication ainsi que la consommation de l'énergie. L'algorithme ce base sur le concept de l'angle polaire minimum.

L'algorithme LPCN qui est présenté en détailles dans [17], son but est de trouver un ensemble fini et minimal de sommets capables de contenir dedans tous les autres sommets du graphe représentant le réseau. L'algorithme démarre d'un sommet avec une coordonnée x minimale dans tous le réseau, et à chaque itération il détermine les sommets du polygone, tel que chaque sommet est donné par le sommet courant qui a l'angle minimum avec les sommets candidats.

L'algorithme D-LPCN c'est la version distribuée de LPCN vu que chaque noeud exécute son propre programme et en communiquant avec ses voisins il décide si c'est un noeud limite ou pas, aussi il fonctionne dans le cas d'une communication bidirectionnelle supposant que la communication entre deux noeuds est symétrique ceci afin d'obtenir les noeuds

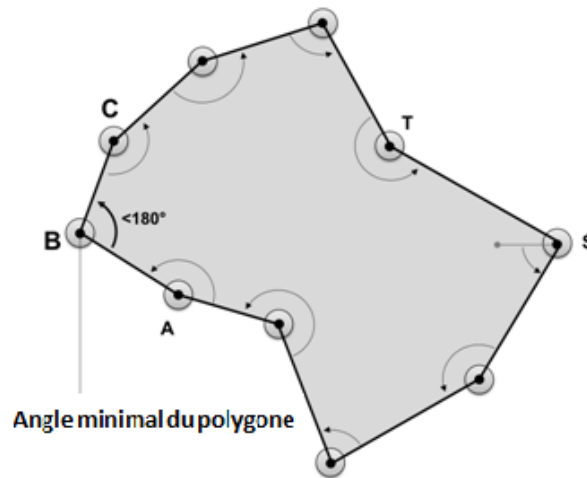


FIGURE 2.4 – Illustration d'un polygone intérieur[5]

limites optimaux, et les noeuds connaissent leurs emplacement dans l'espace en terme de coordonnées (x, y) . Cet algorithme fait appelle à un autre algorithme de recherche minimal pour déterminer le noeud de départ, ce dernier correspond au noeud ayant les coordonnées minimal dans le réseau.

- Le noeud de départ diffuse un message AC à tous ses voisins pour lui communiquer leurs coordonnées tel que monte la figure 2.5 [21].
- Chaque noeud voisin attend la réception d'un message AC en renvoie à l'émetteur un message CS contenant ses coordonnées.
- Pour chaque message CS reçus, le noeud émetteur calcule l'angle minimale formé avec le noeud correspondant.
- Le noeud ayant l'angle minimale envoie un message SN , ce dernier signifie que le noeud a été sélectionné comme noeud limite et il redémarre le même processus avec la diffusion d'un message AC .
- L'algorithme s'arrête lorsque le premier noeud limite est sélectionné une deuxième fois avec un message SN , et de cette méthode que le polygone qui représente la frontière du réseau sera déduit comme illustré dans la figure 2.6 [21].

L'avantage de la solution proposée est que l'algorithme est distribué ce qui permet de réduire le temps d'exécution, d'autre part elle présente l'inconvénient de la complexité qui est très élevée ainsi que l'utilisation du GPS qui engendre une consommation gourmande d'énergie.

Dans [7] les auteurs ont abordé la détection de bord localisé dans les champs de

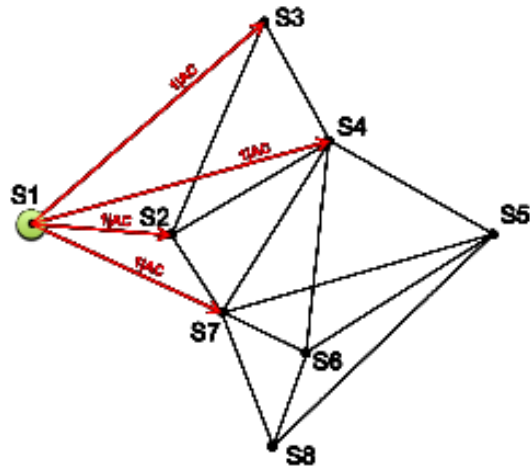


FIGURE 2.5 – La première étape du processus DLPCN[21]

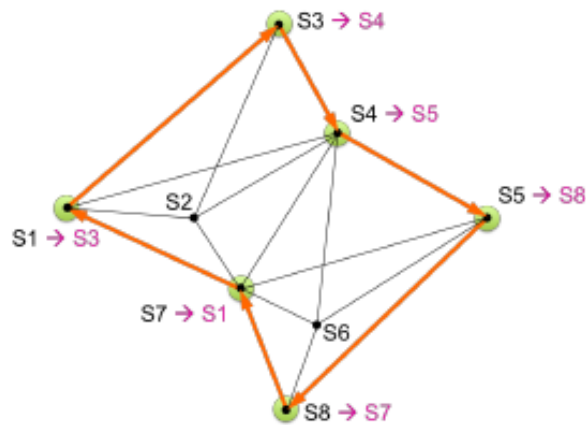


FIGURE 2.6 – Le résultat final du processus DLPCN[21]

capteurs, vu qu'une représentation géométrique de la frontière est plus concise et donc plus économiques en énergie qu'une énumération de tous les trous. Une telle représentation inclue les contours que leur détection a été largement étudiée dans le concept numérique de traitement d'image avec une différence fondamentale entre le champ de capteur et l'image qui réside dans la régularité spatiale de l'information. Un algorithme de recherche de limites écoénergétique devra avoir un élément clés qui est un schéma de détection de bord localisé, ainsi que de tel algorithmes supposent que les noeuds capteurs connaissent leurs emplacements.

supposons le cas d'un phénomène particulier pour lequel il faut détecter sa frontière, d'après ceci le terme champ de capteurs désigne la région géométrique couverte et l'ensemble des capteurs dans la région, chacun de ces derniers à base des informations collectées localement peut déterminer s'il fait partie de cette région couverte par le phénomène ou non, ce qui est assuré par la fonction nommée prédicat d'évènement. Lors de ce processus, deux caractéristiques doivent être vérifiées : la robustesse et la performance, tel que les algorithmes doivent être robustes et en terme de performance ils doivent prendre en mesure l'énergie dépensée en communication et la qualité du résultat qui définit l'épaisseur réelle de bord.

Considérons un prédicat d'évènement pour lequel définir l'intérieur du phénomène par la région spatiale (I) et l'extérieur du phénomène par (O) voir la figure 2.9 [7], d'après cela ils ont proposé une définition idéale du bord d'un phénomène comme étant une arête (E) qui représente l'ensemble de tous les points (x, y) tel que chaque voisinage non vide de (x, y) coupe les deux ensembles I et O , E est appelée bord idéal qui définit la frontière du phénomène. Mais cette définition n'est pas valide sachons que la bord idéal n'a pas d'épaisseur.

Un capteur peut être soit à l'intérieur du phénomène ou bien à une distance r du bord idéal voir figure 2.7 [7], où le r est appelé le rayon de tolérance du capteur et la zone autour du noeud capteur couverte par un cercle de rayon r est appelé le voisinage de tolérance. Le rayon de tolérance permet de vérifier l'efficacité des schémas de détection de bord en mesurant l'épaisseur du bord.

D'après tous cela, les auteurs ont proposé trois approches pour la détection de bord localisé :

- approche statistique
- approche basée sur le traitement d'image
- approche basé sur le classificateur

chaque approche peut être utilisée pour générer une famille d'algorithmes pour la détection des frontières. Dans chacune des solutions, les capteurs recueillent des informations de leurs

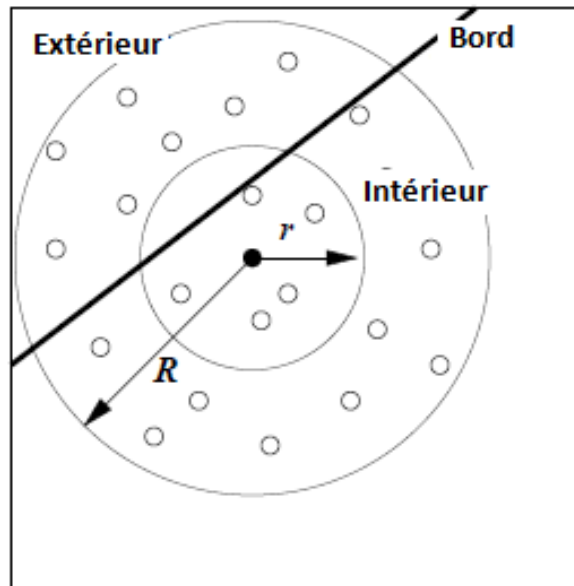


FIGURE 2.7 – Rayon de tolérancechintalapudi2003localized

voisinages pour déterminer si une arête passe par leurs rayons de tolérance (figure 2.8 [7]), la performance des schémas proposés s'améliore en mesure que les informations collectées à partir d'un voisinage plus grand. Après la simulation faite en considérant l'épaisseur de bord et la précision énergétique, ils ont concluent que l'approche basée sur le classificateur est meilleur que les deux autres en termes de performance.

L'algorithme proposé a l'avantage qu'il est simple et ne nécessite pas une densité élevée mai son le résultat s'agit d'une bord alors que la frontière ne doit pas avoir d'épaisseur ce qui pose l'inconvénient de l'exactitude du résultat.

Dans [19] les auteurs ont abordé le problème de l'estimation des limites, qui est le problème majeurs dans l'application des réseaux de capteurs. Ils ont proposé un algorithme basé sur des méthodes de partitionnement multi-échelles, dont l'objectif est de prendre en considération les mesures des capteurs tel que la densité pour déterminer la frontière entre deux domaines de mesures relativement homogènes. L'idée est représentée par la figure 2.10 [19] où :

- L'environnement est divisé en deux et les noeuds sont représentés par des points.
- L'environnement est partitionné en cellules carrées.
- Les capteurs travaillent en collaboration pour déterminer la partition qui correspond à la frontière .
- Approximation final de la frontière entre les deux régions.

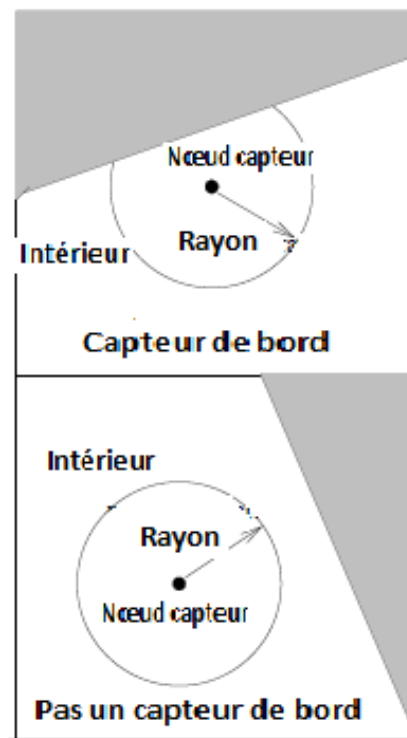


FIGURE 2.8 – Capteur de bordchintalapudi2003localized

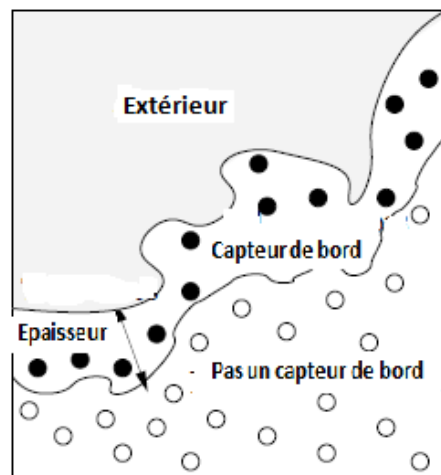


FIGURE 2.9 – Bord localiséechintalapudi2003localized

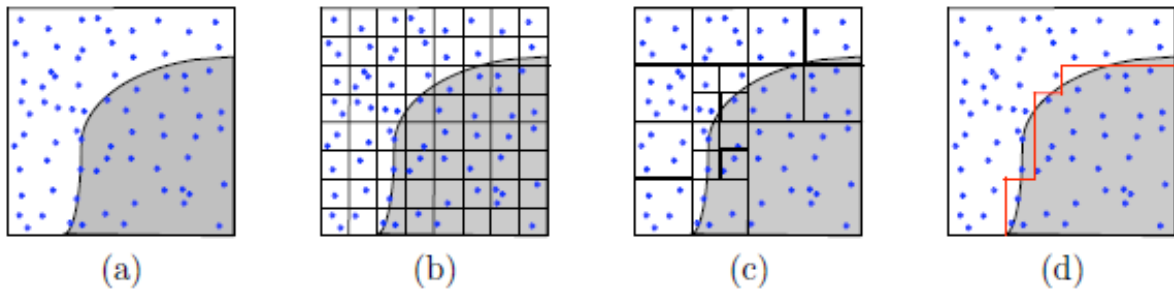


FIGURE 2.10 – Les étapes de l'estimation des limites[19]

L'approche sur laquelle est fondé ce travail consiste à utiliser le principe *RDP* qui consiste à :

- Le domaine des capteurs est représenté par un *RDP* initial sous forme d'un carré, puis le diviser en 4 sous *RDP* de taille égale . Répéter ce processus à nouveau sur chaque sous carré,et donc le processus RDP peut être représenté avec une structure hiérarchique à quatre arbre dont l'objectif est de déterminer le meilleur arbre taillé.
- Dans chaque carré y aura un noeud qui se sert de clusterhead qui assimile les informations des autres noeuds du carré et calcule la moyenne de leurs mesures afin de définir l'estimation du champ selon cette valeur moyenne des mesures.
- A chaque niveau de l'hiérarchie, le clusterhead reçoit la meilleur sous-partition dont la meilleur estimation des quatre clusterhead en dessus.

L'avantage de la solution se présente dans la régularité de la limite estimée, aussi elle permet de déterminer la frontière entre deux domaines relativement homogènes, néanmoins le coût de communication est élevé entres les capteurs qui travaillent en collaboration ainsi que l'algorithme nécessite une densité importante pour fonctionner.

Dans [10] les auteurs ont proposé un algorithme de détection des noeuds limites (limite extérieur ou limite de trou), pour cela ils ont adopté une approche topologique basée sur la connectivité des noeuds, la seul information qu'un noeud connaît c'est ses voisins immédiats et il n'a aucune connaissance de son emplacement géométrique. L'approche de détection des limites est fondée sur le graphe de communication du réseau qui est construit suivant le rayon de communication des noeuds capteurs. Pour bien illustrer la détection des limites dans les WSN, cette approche englobe deux divers cas : le cas continu et le cas discret.

1. *Le cas continu* qui est présenté dans la figure 2.11 [10] tel que :
 - Soit R la région qui représente l'ensemble du réseau

- Choisir un point P de R qui représente un noeud quelconque
- Pour tous point X de R calculer $dp(x)$ qui représente la longueur du plus court chemin de X à P en évitant les trous
- L'ensemble des points $I(k) = \{x \in R / dp(x) = k\}$ représente un iso-niveau ou contour de niveau k .

L'idée c'est d'exploiter ces iso-niveau pour déterminer les noeuds proches de la limite dans le cas où il y aura des contours cassés.

2. *Le cas discret* présenté dans la figure 2.12 [10] où les distances sont mesurée en fonction du nombre de saut de noeuds dans la graphe de communication (en terme de nombre d'arêtes).
 - Choisir 4 noeuds du réseau de sorte qu'ils soient éloignés l'un de l'autre pour couvrir tous le réseau.
 - Pour chaque noeud choisi P_i de R calculer la distance de tous les noeuds du réseau vers celui-là, puis pour chaque distance déterminer un iso-niveau.
 - Dans chaque sous-graphe formé par l'iso-niveau, choisir un noeud pour lequel déterminer les distances vers les noeuds composants le sous-graphe et celui qui présente la distance la plus élevé sera marqué proche de la limite extérieur ou bien celle d'un trou.

L'algorithme proposé dans cette solution est robuste et s'adapte au changement topologique, aussi il est moins coûteux en énergie et permet de limiter les coûts, comme inconvéniens nous concluons ce qui suit : Les distances ne sont pas définies entres les capteurs, ce qui demande plus de calculs, Le choix des noeuds est au hasard ce qui produit le risque d'erreur, pour dire qu'un noeud est à la frontière il faut qu'il donne la distance la plus élevée, quand on choisi aléatoirement le noeud pour le vérifier, on peut tomber sur le mauvais noeud et oblige un graphe de communication dense.

Dans [23] l'auteur cite que la couverture est considérée comme une mesure importante de la qualité de service fournie par un réseau de capteur sans fil. La découverte des limites de la couverture des trous est importante dans le réseau de capteur, dans cette article ils ont proposé un algorithme distribué pour la détection de la couverture des trous pour trouver les limites de trous. Le processus adapté peut être résumé comme suit :

1. Chaque capteur obtient ses informations sur les voisins à 1 et 2 saut et construit un graphe des voisins.
2. Sur la base du graphique des voisins un noeud peut déterminer que ce soit un noeud de limite de trou ou non en vérifiant s'il existe un cycle hamiltonien (lorsque on passe par tout les sommets et on reviens toujours au premier noeud point de départ) dans

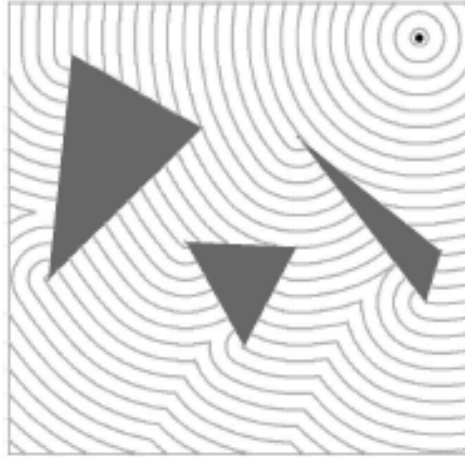


FIGURE 2.11 – Illustration du cas continu[10]

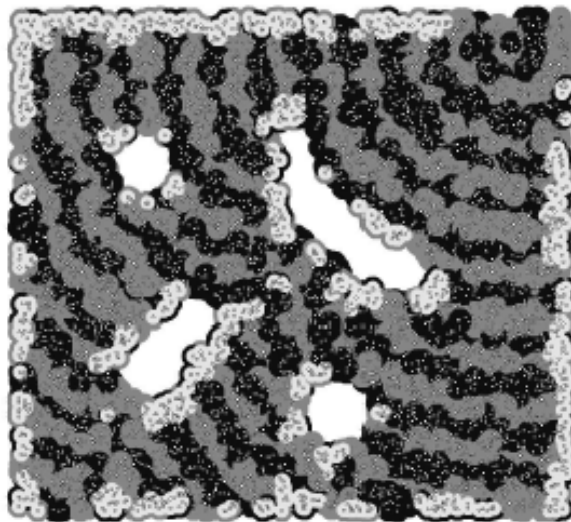


FIGURE 2.12 – Illustration du cas discret[10]

son graphe voisin. S'il existe, le noeud est supposé être un noeud de limite sans trou, sinon on suppose être la limite du trou.

3. Lorsque chaque noeud a déterminé s'il s'agit d'un noeud à la frontière d'un trou ou non, il peut diffuser ces informations à ses voisins. Ensuite chaque noeud connaît l'état de ses voisins, après cela certains noeuds initient un processus de découverte pour trouver des cycles délimitant des trous.
4. Il est possible que certains cycles trouvés à l'étape 3 ne sont pas minimums ou certains cycle ont lié le même trou donc c'est nécessaire de prendre en compte la vérification de tous cycle trouvé.

L'algorithme proposé offre une solution pour le problème de couverture mai il consomme plus d'énergie ainsi que le temps de localisation sera plus élevé dans le cas qu'un cycle n'est pas minimal.

Dans [15] les auteurs se sont intéressés à l'auto-organisation des réseaux de capteurs avec un grand nombre de noeuds qui n'ont aucune connaissance de la topologie du réseaux ou de la position des autres noeuds, le seul moyen d'interconnecter c'est par le partage des messages entres les noeuds à portée de leurs rayon de communication. L'objectif c'est de produire un algorithme qui permet l'auto-organisation des noeuds capteurs dans des structures à grand échelle, ceci donne lieu à l'amélioration de la frontière ainsi que la reconnaissance de la topologie du réseau. Suivant des connaissances topologiques et géométriques définir un algorithme d'amélioration pour la détection des limites, cet algorithme fait appelle à deux procédures : la première appelée procédures de démarrage et le seconde procédure d'augmentation.

1. *Procédure de démarrage* : dont le but est de définir des noeuds qui sont à l'intérieur d'une région polygonale sous forme d'un cycle, ceci est assuré par un graphe particulier de fleurs. Une fleur est une structure strictement locale qui défini une région peuplée de noeuds, les étapes pour détecter une fleur sont comme suit :
 - Chaque noeud récupère le sous-graphe de voisinage local.
 - Trouver une fleur : chaque noeud décide de lui même s'il est la graine d'une fleur.
 - Annoncer la mise à jour : il peut avoir plusieurs fleurs entrecroisées, alors le noeud décide quelle graine a la priorité la plus élevée pour mettre à jour son propre statut selon la nouvelle fleur à laquelle il appartient.
 - La mise à jour : les noeuds qui font partie d'une fleur stockent leurs nouveaux statuts et les informations supplémentaires associées.
2. *Procédure d'augmentation* : d'après la procédure précédente plusieurs cycles sont identifiés, dans cette phase le but c'est d'appliquer une méthode d'amélioration qui

permet d'augmenter les cycles comme suit :

- Considérons un ensemble de cycles, ouvrir chaque cycle de sorte est ce qu'il couvre les noeuds inexploités dans son voisinage.
- Puis reconnecter les extrémités de sorte à ne pas avoir de trous.
- Dans chaque cycle un noeud appelé initiateur de la recherche va s'occuper de chercher une augmentation du cycle qui le contiens, ceci en exécutant les étapes suivantes :
 - * recherche cyclique
 - * vérifier la solution(retour en arrière ou bien faisabilité de la requête)
 - * annoncer une mise à jour
 - * Mise à jour

La solution présentée est déterministe et économie en énergie, mai elle engendre un Coût de communication très élevé comme ça nécessite une densité importante.

Dans [20], un certain nombre d'algorithmes de sélection sont proposés pour l'auto-sélection des noeuds limites (B) uniquement sur la base informations disponibles à 1 saut et les caractéristiques géométriques. Ils ont commencé par donner quelques hypothèses et méthodologies :

- Les noeuds de capteurs sont modélisés sous forme de graphes unitaires de disques (UDG), et sont supposés être homogènes et bidirectionnels connectés lorsqu'ils sont à portée l'un de l'autre.
- Les plages de détection sont considérées égaux, les noeuds de capteur peuvent être mobiles ou statiques et leurs emplacements et les distances des voisins sont connues par GPS ou tout autre méthodes de localisation.
- Il suppose aussi que chaque noeud dispose d'informations à jour et valides sur ses voisins à 1 saut et ses environs.
- Avant l'événement D , les noeuds ont entièrement des informations à jour concernant leurs voisins, cependant après l'événement D ils ne peuvent pas déterminer si leur voisin est devenu un noeud B ou est resté comme un noeud interne (N).

Parmi les algorithmes proposés l'algorithme BNS qui est un algorithme de sélection des noeuds limites distribué permettent au noeuds limites B de s'auto-sélectionner en fonction des voisins à 1 saut et leur informations géométriques disponibles, et supposer que les noeuds B sont conscients de leur degré (le nombre de connexions locales à un saut) à la fois avant et après un événement D , alors qu'ils ne connaissent que les degrés et distances de leurs noeuds UN et noeuds DN . Il ajoute aussi que les NB (noeuds limite) qui sont plus proches de la zone de D peuvent obtenir plus de mesures précises sur l'événement

D. Par conséquent, si un noeud b_i est situé à (x_i, y_i) , le trou de couverture du rayon du *rhole* est situé à (x_{hole}, y_{hole}) et $Nb(i)$ c'est le nombre de noeuds B sélectionnés. Cette zone est divisée en cellules et la couverture des cellules est mesurée comme le nombre de noeuds couvrant les coordonnées des coins des cellules $z_i = (x_i, y_i)$. Il convient de noter qu'en raison des noeuds B , la zone donnée peut ne pas être complètement couverte même si tous les $MBnodes$ sont sélectionnés.

La solution a l'avantage qu'elle répond au cas où un dommage se produit comme elle n'oblige pas une densité très élevée, mais elle est coûteuse en énergie et un autre inconvénient c'est qu'ils ont supposé que les noeuds sont homogènes alors qu'ils peuvent ne pas l'être.

Dans [16] ils ont proposé l'algorithme *PSO*, c'est un algorithme d'optimisation efficace sur le plan des calculs. Il a été appliqué pour résoudre les problèmes dans les WSN tel que l'optimisation, le déploiement, localisation des noeuds et l'agrégation de donnée. Les techniques d'optimisation nécessitent d'énormes calculs et efforts qui augmentent de façon exponentielle à mesure que la taille de problème augmente, donc cette algorithme facilite la mise en oeuvre haute qualité des solutions, efficacité et rapidité de calcul.

Algorithme PSO : PSO modélise le comportement sociale d'un troupeau d'oiseau. Il se compose d'un essaim de solutions candidates appelées particules qui explorent un hyperspace à n dimensions à la recherche de solution globale (représente le nombre de paramètres optimaux). Une particule occupe la position X_{id} et vitesse V_{id} dans la dimension d de l'hyperspace tel que $1 \leq i \leq s$ et $1 \leq d \leq n$, chaque particule est évalué à travers une fonction objective $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ où $f : R \Rightarrow R$. Dans chaque itération K , la vitesse v et la position X sont mises à jour à l'aide des deux équations 2.1 et 2.2 :

$$V_{id(k+1)} = \omega \times V_{id(k)} + \varphi_1 \times r_1(k) \times (pbest_{id} - X_{id}) + \varphi_2 \times r_2(k) \times (gbest_d - X_{id}) \quad (2.1)$$

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + V_{id}(k+1) \quad (2.2)$$

La mise à jour : le processus est répété de manière itérative jusqu'à ce qu'un $gbest$ acceptable est atteint ou un nombre fixe d'itération $Kmax$ est atteint pour 2.1 et 2.2 sont des constantes, $r_1(k)$ et $r_2(k)$ sont des nombres aléatoires uniformément repartis dans $[0, 1]$. Parmi les avantages présentés c'est qu'elle est une solution de haute qualité avec la facilité de la mise en oeuvre ainsi que la disponibilité de directives pour le choix des paramètres.

Dans[13] la principale contribution est de développer un algorithme distribué simple et pratique pour découvrir les noeuds frontières avec moins de frais généraux et temps de communication, cette algorithme est divisé en trois phases, pour la simplification ils ont

noté que tout au long de cet article ils utilisent le terme obstacles au lieu des trous et frontière du champ de détection.

1. *La sélection des noeuds de fermeture* : Dans cette phase, ils commencent par sélectionner les CN (noeuds de fermeture), qui entourent les obstacles. Construire un repère hexagonal virtuel VHL en sélectionnant certains noeuds spécifiques comme noeuds de repère (LN) au sein du réseau. Les LN sont régulièrement hexagonaux et repartis sur le réseau même lorsque un VHL est construit sous formes de réseau irrégulières, ensuite chaque LN s'identifie à devenir un CN ou demeure encore un LN .
2. *Identification des cycles aux limites grossières* : Dans la deuxième phase, ils connectent les CN pour former les limites approximatives entourant les obstacles. Ces limites approximatives sont appelées cycles CBC et chacune d'elles se voit attribuer un identifiant unique (c'est-à-dire $CBC_I D$).
3. *Découvrez les noeuds de frontière exactes* : Cette phase permet de découvrir les noeuds limites exactes BN ceux qui entourent les obstacles pour créer de limite. Dans un premier temps, certains BN près des obstacles sont sélectionnés pour lancer la procédure. Chaque BN se connecte à ses deux BN les plus proches de l'obstacle sur ses deux côtés, Finalement, les BN se connectent les uns aux autres en fermant les obstacles pour former les limites complètes.

Parmi les avantages de cet algorithme : il est moins coûteux en énergie et en temps de communication, ainsi qu'il n'exige la localisation des noeuds. Par contre cette solution engendre un coût de communication élevé entre les noeuds.

Dans[8] ils ont développé un algorithme pour détecter les noeuds frontières dans un WSN. L'algorithme ne nécessite pas que les noeuds capteurs soient équipés de GPS. De plus, l'algorithme repose sur une communication minimale entre un noeud et ses voisins, ce qui rend l'algorithme adapté aux RCSFs. La précision de l'algorithme est évaluée pour diverses topologies de réseau et différents paramètres. ils ont commencé par donner quelques définitions et notations pour pouvoir présenter leur algorithme.

1. *Notations utilisées* :

- Un réseau de capteurs avec n noeuds peut être modélisé sous la forme d'un graphe $G = (V, E)$, où $n = |V|$ représente l'ensemble des noeuds du réseau et E est l'ensemble des arêtes non dirigées $e(i, j)$, où $i, j \in V$ et le noeud v_j est dans la plage de communication du noeud v_i .
- $p \in V$ un noeud du réseau, définissons $Nk(p)$ comme l'ensemble de tous les noeuds situés à moins de k sauts du noeud p . Formellement,

$Nk(p) = i : i \in V, d(p, i) \leq k$, où $d(p, i)$ représente la distance entre les noeuds ϑ_p et ϑ_i .

- $Nk(p)$ représente le voisinage fermé d'ordre k de ϑ_p dans G .
- L'ensemble $N1(p)$, ou simplement $N(p)$, contient tous les noeuds qui se trouvent dans la plage de communication du noeud ϑ_p . Formellement,
 $N(p) = i : i \in V, (p, i) \in E$.

2. *Définitions :*

- *Noeud intérieur :* un noeud $p \in V$ est un noeud intérieur s'il y a au moins trois noeuds $a, b, c \in V$ tels que $a, b, c \in N(p)$ et les noeuds a, b, c forme un triangle qui entoure le noeud p .
- *Noeud frontière :* un noeud $p \in V$ est un noeud frontière si ϑ_p n'est pas un noeud intérieur. Définissez B comme l'ensemble des noeuds frontières dans le réseau.
- *Limite du réseau :* La ligne imaginaire qui relie les noeuds frontières du réseau sont définies comme une limite de réseau, cela définit le périmètre de l'ensemble du réseau.

3. *Description de l'algorithme proposée InteriorPoint :*

- on prend par exemple quatre noeuds P, A, B, C et $dAP, dBP, dCP, dAB, dBC, dCA$ les distances entre ces noeuds.
- Trouver les zone (air) $\Delta s ABC, PAC, PBC$, et PCA en utilisant la formule :
 $\text{air} = \sqrt{[s(s-a) - (s-b)s - c]}$ où $s = (a+b+c)/2$ et a, b, c ont une longueur de trois côtés du Δ
- Si $\text{Air } \Delta ABC = \text{Aire}(\Delta PAC + \Delta PBC + \Delta PCA)$ alors P est à l'intérieur du ΔABC
- Sinon P est à l'extérieur du ΔABC donc à la frontière.

Cet algorithme *IP* vérifie si un noeud donné est enfermé ou non à l'intérieur de ses trois voisins choisis. La précision du résultat dépend de comment choisir les trois voisins A, B et C du noeud P Parce que peut-être chacun des noeuds aura plus de trois voisins. Il est possible que le noeud P sera le noeud intérieur ou extérieur selon les trois noeuds voisins choisis.

Parmi les avantages de cet algorithme est qu'il repose sur une communication minimale entre un noeud et ses voisins ainsi que cet algorithme ne nécessite pas que les noeuds de capteurs soient équipés de GPS ce qui le rend pas vraiment coûteux en énergie. Mais le choix des trois noeuds voisins présente un inconvénients pour cette solution puisqu'il peut influencer sur l'exactitude du résultat.

Dans [18] les auteurs ont présenté leur algorithme pour la détection des noeuds fron-

tières qui s'agit de noeud connecté au moindre angle polaire dans sa version distribuée (DLPCN), en minimisant les frais généraux de communication. Cet algorithme a trois types de messages de contrôle qui sont : (AC, CS, SN) .

- AC est utilisé pour demander des coordonnées.
- CS est utilisé pour envoyer des coordonnées au noeud qui les a demandé.
- SN est utilisé pour informer un capteur qu'il s'agit d'un noeud frontière.

L'algorithme DLPCN commence à fonctionner à partir d'un noeud principal qui possède la coordonnée minimal dans le réseau, pour cela ils ont utilisé un algorithme qui s'appelle MinFind pour sélectionner ce noeud. puis exécuter leur algorithme qui est présenté en 6 étapes comme suit :

- Étape 1 : Si le noeud actuel est un noeud de départ, il démarre l'algorithme *DLPCN* en diffusant le message AC à ses voisins afin de demander leurs coordonnées.
- Étape 2 : chaque noeud dans un état en attente de recevoir un message
- Étape 3 : si le noeud reçoit un message AC , il renvoie un CS message contenant ses coordonnées à l'émetteur ayant l'identifiant id .
- Étape 4 : lorsqu'un noeud reçoit des messages CS , il calcule l'angle minimal formé avec l'émetteur du message.
- Étape 5 : le noeud frontière actuel envoie SN au noeud qui forme l'angle minimum.
- Étape 6 : lorsqu'un noeud reçoit un message SN , cela signifie que le noeud a été sélectionné comme noeud de frontière. Ce noeud va envoyer un message AC à ses voisins pour recevoir leurs coordonnées via le message CS , puis recherchez le noeud suivant qui forme un angle minimal pour le sélectionner comme noeud de frontière et répéter le même processus jusqu'à obtenir la frontière complète.

Parmi les avantages de cette algorithme : il possède une bonne précision pour la détection des noeuds frontières et permet aussi de réduire le temps d'exécution car c'est un algorithme distribué, d'autre part présente l'inconvénient de la complexité qui est plus élevée.

Dans [17] les auteurs ont proposé une solution pour trouver les sommets frontières dans un graphe euclidien connecté tel que ce dernier représente l'ensemble des noeuds du réseau et les liens de communication entre eux, cet ensemble de sommets permet de donner la forme géométrique du graphe sous forme d'une coque polygonale qui est l'idée de base du protocole *LPCN* (Least Polar-angle Connected Node) présenté dans ce travail.

A la base *LPCN* est le résultat d'une amélioration de l'algorithme de Jarvis qui détermine les bordures d'un ensemble fini de points. L'algorithme de Jarvis sélectionne dans chaque itération le noeud qui forme d'angle minimal avec l'horizontale gauche passant par le noeud courant, contrairement au protocole *LPCN* qui choisit le prochain noeud frontière formant l'angle minimal obtenue par le noeud frontière précédent, le noeud courant

et un de ces voisins. Cette solution présente le protocole *LPCN1* la première version de *LPCN*, mais son majeur problème c'est qu'il ne fonctionne pas pour tous les types des graphes, pour cela la deuxième version *LPCN2* résout ce problème en permettant de déduire la forme géométrique du polygone représentant la frontière contrairement au *LPCN1* qui donne uniquement les sommets du polygone. Par la suite ils ont amélioré le protocole *LPCN* de façon à offrir une solution distribuée et ils ont aboutie au protocole *DLPCN* présenté dans [21] et [18].

Le principale avantage de ce protocole est qu'il possède une grande précision dans la détection des noeuds frontières, néanmoins il exploite plus de temps pour l'exécution ce qui augmente la complexité temporelle de l'algorithme.

2.3 Classification

Dans le tableau 2.1, nous présentons une classification des protocoles décrits dans la section 2.2 suivante. En effet, nous classifions les travaux en deux catégories à savoir : (1) l'approche topologique, (2) l'approche géométrique. Cette classification se base sur la nature des informations utilisées par les différents protocoles étudiés, ceux de l'approche topologique utilisent les informations de connectivité entre les noeuds capteurs ainsi que la topologie du réseau qui se représente généralement sous forme d'un graphe connecté avec l'ensemble des noeuds et les lien de communication entre eux sans avoir connaissance des emplacements des noeuds capteurs dans le réseau. D'autre part, les protocoles qui se basent sur les informations de géométrie tel que le calcule des distances notamment des angles entre les noeuds forment la catégorie de l'approche géométrique pour laquelle les calcules sont plus simples puisqu'il s'agit des formules mathématiques en général et aussi les emplacements des noeuds sont connus grâce à l'utilisation du GPS.

| Approche | Idée de base | Avantages | Inconvénients | Références |
|--------------------|---|---|--|---|
| Géométrique | Utiliser les informations de géométrie et le GPS | Facilité des calculs, résultats exactes | Consomme plus d'énergie, influence sur la durée de vie du réseau, engendre un coût supplémentaire. | [22] , [5] , [21] , [16] , [8] , [18] , [17] |
| Topologique | Utiliser les informations de connectivité entre les noeuds et les arbres de parcours pour le réseau | Pas d'utilisation de GPS ce qui permet de réduire la consommation d'énergie | Engendre une complexité plus élevée et la charge de communication entre les noeuds. | [14] , [11] , [7] , [19] , [10] , [23] , [15] , [20] , [13] |

TABLE 2.1 – Classification des protocoles de localisation

2.3.1 Comparaison des protocoles étudiés

Le tableau 2.2 montre les différents travaux étudiés qui sont comparés selon plusieurs paramètres :

| Protocole | Utilisation GPS | Complexité | Cons. d'énergie | Centralisé ou Distribué | Choix du 1er noeud | Densité |
|-----------|-----------------|------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|----------------|
| [14] | Non | Élevée | Peu coûteuse | Centralisé | Aléatoire | Moins dense |
| [11] | Non | Élevée | Peu coûteuse | Centralisé | Aléatoire | Moins dense |
| [22] | Oui | Élevée | Plus coûteuse | Distribué | Aléatoire | Pas importante |
| [5] | Oui | Moyenne | Plus coûteuse | Distribué | Coord. minimales | Pas importante |
| [21] | Oui | Moyenne | Plus coûteuse | Distribué | Coord. minimales | Pas importante |
| [7] | Oui | Basse | Plus coûteuse | Centralisé | Aléatoire | Pas importante |
| [19] | Oui | Moyenne | Peu coûteuse | Centralisé | Aléatoire | Importante |
| [10] | Non | Moyenne | Peu coûteuse | Centralisé | Aléatoire | Importante |
| [23] | Oui | Moyenne | Plus coûteuse | Distribué | Aléatoire | Pas importante |
| [15] | Non | Moyenne | Peu coûteuse | Distribué | Aléatoire | Importante |
| [20] | Oui | Moyenne | Plus coûteuse | Distribué | Aléatoire | Pas importante |
| [13] | Non | Moyenne | Peu coûteuse | Centralisé | Aléatoire | Moins dense |
| [8] | Non | Moyenne | Peu coûteuse | Centralisé | Aléatoire | Pas importante |
| [18] | Oui | Moyenne | Plus coûteuse | Distribué | coordonné x minimal | Pas importante |
| [17] | Oui | Moyenne | Plus coûteuse | Centralisé | coordonné x minimal | Pas importante |

TABLE 2.2 – Comparaison des protocoles de localisation des noeuds frontières étudiés

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude d'un ensemble de travaux réalisés dans le contexte de la localisation des noeuds ainsi que la découverte des frontières dans les réseaux de capteurs sans fils. La découverte des frontières d'un réseau de capteur sans fil est une branche dans laquelle le domaine des recherches est ouvert vu son importance dans le monde technologique. Chaque travail possède ces propres caractéristiques, notant que il peut y avoir des caractéristiques communes tel que la consommation d'énergie et la charge de communication entre les noeuds, ces deux derniers sur lesquels nous allons travailler pour présenter notre contribution dans le chapitre suivant.

Contribution et simulations

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter notre contribution, elle s'agit d'une amélioration du protocole LPCN (Least Polar-angle Connected Node) [17], ce dernier traite le problème de la détection des frontières dans les réseaux de capteurs sans fil. Plus précisément, nous proposons une solution qui permet de minimiser la consommation d'énergie par rapport à celle consommée par le LPCN. La section 3.2 présente en détail la problématique abordée, la section 3.3 décrit notre solution en détaillant la technique de dissimulation [1][6]. Ensuite, nous expliquons les différentes phases de notre solution dans la section 3.4 et décrivons l'algorithme dans la section 3.5. Nous terminons avec la section 3.6 où nous présentons les résultats des simulations et d'évaluation des performances.

3.2 Présentation du problème

Divers problèmes sont liés aux réseaux de capteurs sans fil, à savoir le problème de la localisation des noeuds et ainsi le problème du calcul des frontières du réseau, ceci ce diffère d'une approche à une autre. Avec l'approche topologique le calcul des frontières sera plus compliqué puisque cette approche utilise les informations de connectivité et la communication entre les noeuds. Généralement dans l'approche géométrique le GPS est utilisé pour résoudre le problème de la localisation ce qui facilite le calcul des frontières tel qu'il est le cas du protocole LPCN [17] que nous avons étudiée dans le chapitre précédent, néanmoins cette solution est très coûteuse en énergie ce qui influence la durée de vie du réseau.

Dans le cas de notre solution, les noeuds capteurs sont équipés de GPS qui sera activé à l'alerte de la station de base. Notre objectif est de trouver une solution pour minimi-

ser l'utilisation du GPS pour la localisation des noeuds afin de réduire la consommation d'énergie, et par la suite faire appel au protocole LPCN pour la découverte de la frontière. Le LPCN comme nous l'avons détaillé utilise la solution du GPS pour la localisation de tous les noeuds, pour rechercher par la suite la frontière du réseau.

Notre travail considère un réseau de capteurs sans fil composé d'un ensemble de noeuds capteurs mobiles déployés aléatoirement dans une surface, avec une station de base positionnée à l'extérieur du réseau s'occupant des différents traitements effectués par l'ensemble des noeuds du réseau. Nous considérons que le réseau est homogène tel que tous les noeuds capteurs ont les mêmes caractéristiques comme le rayon de communication et l'énergie initiale.

3.3 Description de la solution

Notre solution est centralisée où l'exécution et les différents traitements sont effectués au niveau de la station de base. La solution que nous avons proposée est une amélioration du protocole LPCN de sorte à minimiser l'utilisation du GPS et donc réduire la consommation d'énergie, ceci est garanti par les deux principes que nous avons utilisés et incorporés à savoir la technique de la trilatération pour la localisation des noeuds et la technique de la dissimulation pour l'envoi des messages vers la station de base. La trilatération permet d'estimer les coordonnées d'un noeud capteur sans avoir besoin de l'utilisation du GPS, à condition que le noeud possède trois références. Pour la dissimulation [1], nous allons l'utiliser selon la norme du réseau, dans le but d'économiser l'énergie consommée lors de l'échange des informations des noeuds vers la station de base. Notre solution fonctionne en trois étapes qui sont : (1) la découverte du réseau, (2) la localisation des noeuds et enfin (3) la recherche de la frontière avec le protocole LPCN.

3.3.1 Dissimulation

Dans les réseaux de capteurs mobiles (MWSN), le standard IEEE 802.15.4 définit deux modes de fonctionnement : le mode "beacon" et le mode "non-beacon"[6]. Le premier mode consiste à ce que les noeuds capteurs diffusent périodiquement des trames pour la synchronisation et l'échange des informations de contrôle, par contre dans le deuxième mode, les noeuds du réseau sont inactifs et ils seront activés en cas d'évènement en envoyant une trame d'alerte [6]. Notre contribution fonctionne en mode "beacon".

Des trames "beacon" font déjà partie du fonctionnement du réseau, l'idée de la dissimulation qui consiste à exploiter ces trames "beacon" pour intégrer et échanger les données de

contrôle importantes dans le réseau[6], au lieu que ces informations soient insérées comme des blocs de données séparés[6], ceci permet de ne pas surcharger le réseau par la communication des messages de contrôle nécessaires pour son fonctionnement, et donc de minimiser la consommation de l'énergie de communication (overhead) dans le réseau. La dissimulation dans notre contribution prend une partie très importante de la solution, nous avons utilisé cette technique dans la partie de découverte du réseau pour l'envoi des listes des voisins de chaque noeud vers la station de base.

L'utilisation de l'idée de la dissimulation dans notre solution, peut être appliquée avec la norme du réseau son aucune exigence. En général il y a quatre types de trames [1] à savoir : les trames de commande (*command frames*), les trames beacon (*beacon frames*), les trames de données (*data frames*) et les trames d'acquiescement (*acknowledgment*), chaque trame contient généralement les champs suivants [1] : le champ de contrôle (*control frame*), vérification d'erreur (*checking errors*), les adresses (*addresses*), le champ contrôle de séquence (*sequence control*) et la portée (*range*).

Les différents champs exploitables dans chaque trame de la norme WiFi et la norme ZigBee sont illustrés dans les figures 3.1 et 3.2 suivantes [1].

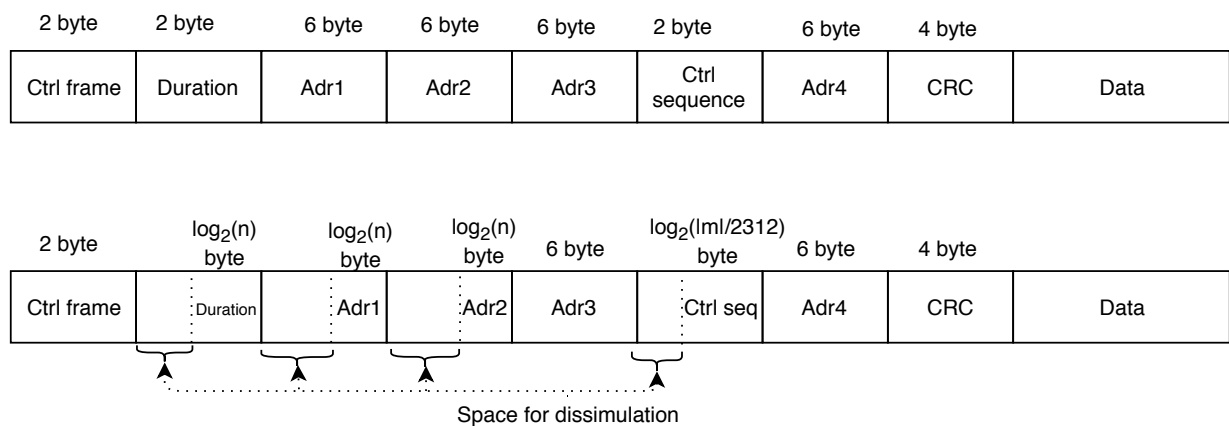


FIGURE 3.1 – Champs exploitables dans WiFi

Grâce à la dissimulation nous pouvons transférer des messages contenant des informations importantes des noeuds vers la station de base sans aucune diffusion (overhead), ce qui nous permet de minimiser la consommation de l'énergie due à la communication.

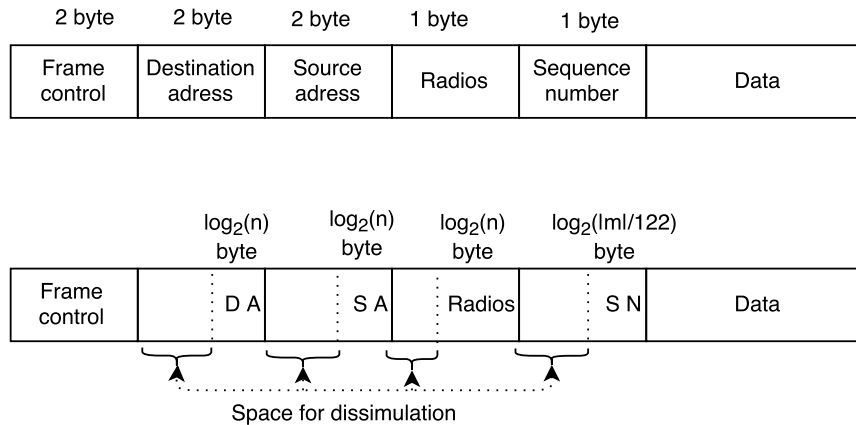


FIGURE 3.2 – Champs exploitables dans ZigBee

3.4 Les phases de la solution proposée

Notre solution est composée de trois étapes, que nous allons décrire dans ce qui suit :

3.4.1 La découverte de réseau

La première phase de notre contribution est la construction de la topologie du réseau par la station de base, c'est une étape nécessaire dans tous les protocoles existants dans la littérature dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil. Au cours de cette étape la station de base construit la topologie globale initiale du réseau pour pouvoir poursuivre les étapes suivantes, Après le déploiement des noeuds d'une façon aléatoire dans la zone de surveillance du réseau, la station de base diffuse un message à tous les noeuds pour l'initialisation du réseau sachant que la propagation du message s'effectue par ondes électromagnétiques [6]. De leurs part chaque noeud capteur, en utilisant sa puissance maximal du signal, diffuse un message *Hello* pour la découverte de ses voisins, la diffusion du message de la part d'un noeud atteint la distance qui correspond à son rayon de communication, Cela permet d'atteindre tous ses noeuds voisins.

Lorsqu'un noeud reçoit une réponse au message *Hello* envoyé, il estime et sauvegarde l'intensité du signal de son voisin, ce qui lui permet de calculer la distance qui les sépare. Il construit par la suite sa liste des voisins contenant leurs identifiant avec leurs puissances maximales du signal puis la diffuse à la station de base par dissimulation[1]. La station de base de sa part récupère la liste des voisins de chaque noeud et construit la topologie globale du réseau en utilisant les informations de la puissance maximal du signal. Cette

étape de découverte est associée à un seuil de temps, pour lequel chaque noeud attend les réponses possibles de la part de ses voisins lors de la diffusion du paquet *Hello*. Quand ce seuil de temps est écoulé le noeud n'attend plus de réponse et il construit sa liste des voisins pour la transmettre vers la station de base par la dissimulation.

3.4.2 La localisation des noeuds capteurs

Cette étape s'effectue de façon centralisée au niveau de la station de base, elle permet à la station de base d'avoir connaissance des emplacements de tous les noeuds capteurs, pour cela nous avons utilisé la technique de la trilatération pour la localisation de certains noeuds en se basant sur la collaboration entre les noeuds capteurs, pour estimer les coordonnées de leurs voisins. En comparant avec le protocole LPCN, ce dernier utilise le GPS pour la localisation de tous les noeuds, par contre notre solution a pour objectif principal de minimiser le nombre de noeuds qui utilisent le GPS pour se localiser dans le réseau, en intégrant la technique de la trilatération qui permet d'estimer les coordonnées d'un noeud capteur sans avoir besoin de GPS lorsqu'il possède comme références trois voisins dont leurs emplacement sont connus.

L'efficacité de cette technique est très importante dans le cas où le degré de connectivité est un peu plus élevé qu'il soit 3 ou plus, puisqu'un noeud doit avoir au moins trois références pour pouvoir appliquer la trilatération et donc à chaque fois que le degré de connectivité est plus grand y'aura plus de chances de localiser des noeuds sans avoir besoin de GPS ce qui permet de minimiser la consommation d'énergie lors de cette phase de localisation. Une référence est un voisin pour lequel ses coordonnées sont connues, la trilatération nécessite la connaissance des positions des noeuds références et les distances qui les séparent du noeud en question, la position de ce dernier sera calculée par l'intersection des trois cercles formés par les trois références comme illustré dans la figure 3.3 [6]

La station de base a déjà récupéré les listes des voisins de tous les noeuds dans la phase précédente, sachant que tous les noeuds sont équipés de GPS qui sera activé en cas d'alerte de la part de la station de base. Cette dernière commence la phase de localisation en envoyant une alerte au deux premiers noeuds qui ont un degré de connectivité important suivant le nombre de leurs voisins, pour activer leurs GPS et récupérer leurs coordonnées, puis la station de base consulte les listes des voisins pour récupérer le noeud qui sera voisin commun avec ces deux là qui se sont localisés par GPS, un voisin commun des deux noeuds localisés peut se localiser par trilatération en considérant la station de base comme sa troisième référence. Puis dans l'itération suivante la station de base va chercher les voisins communs des noeuds localisés dans l'itération précédente pour les localiser par trilatération

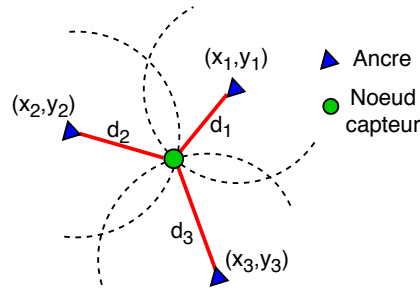


FIGURE 3.3 – La technique de la trilatération

suivant le même principe d’avoir trois références pour estimer la position, néanmoins dans le cas où le voisin commun n’existe pas la station de base envoie une alerte au prochain noeud pour activer son GPS et récupérer ses coordonnées. Par un processus itératif la station de base va localiser la suite des noeuds du réseau, après cette phase nous pouvons conclure le nombre de noeuds utilisant le GPS par rapport au protocole LPCN où tous les noeuds du réseau sont localisés par GPS.

3.4.3 La découverte de la frontière

Après avoir présenté nos deux principes de notre contribution à savoir : l’utilisation de la dissimulation dans la première phase pour l’échange des listes des voisins vers la station de base et la trilatération dans la deuxième phase pour la localisation des noeuds, dans cette troisième phase nous allons appliquer le principe du protocole LPCN[17] pour la découverte de la frontière du réseau. L’objectif majeur dans LPCN c’est de définir la frontière du réseau sous forme d’un polygone avec un ensemble fini et minimal de sommets qui sont les noeuds frontières du réseau, un noeud est défini comme noeud frontière s’il forme un angle minimal avec son prédécesseur, dans chaque itération calculer les angles formés par le noeud frontière courant avec ses voisins, le noeud voisin qui donne l’angle minimal sera sélectionné comme prochain noeud frontière et poursuivre le processus jusqu’à avoir la frontière complète.

L’algorithme LPCN choisit le premier noeud frontière par lequel commencer le processus de découverte comme étant le noeud capteur qui a la coordonnée X minimale. Dans notre solution nous proposons de prendre le premier noeud celui qui est le plus proche à la station de base, ceci permet d’éviter la consommation d’énergie et aussi réduire la complexité en

comparant avec le LPCN où la recherche du premier noeud frontière fait appelle à un autre processus ce qui consomme plus d'énergie et influence sur la complexité de l'algorithme. La station de base détecte le noeud capteur le plus proche à elle en mesurant sa distance vers tous les noeuds du réseau en se basant sur l'intensité du signal quand les noeuds communiquent avec elle, pour cela utiliser le mécanisme du RSSI (Received Signal Strength Indication) qui permet de calculer la distance à partir du signal reçu.

3.5 L'algorithme proposé

Dans cette section nous allons présenter notre algorithme centralisé qui est une contribution du protocole LPCN pour la localisation et la découverte de la frontière dans les réseaux de capteurs sans fils. Notre contribution est présentée par trois phases chacune est exprimée par une partie de l'algorithme à savoir : l'algorithme (1) permet la découverte du réseau par la station de base pour construire la topologie initiale du réseau et identifier le voisinage entre les noeuds où nous avons incluse la technique de la dissimulation pour l'échange des informations de la part des noeuds capteurs vers la station de base, l'algorithme (2) permet la localisation des noeuds capteurs au niveau du réseau en ce basant sur la collaboration entre les noeuds pour l'estimation des positions en utilisant la technique de la trilatération et l'algorithme (3) consiste à appliquer le LPCN pour la découverte de la frontière du réseau avec une différence dans le choix du premier noeud frontière comme nous l'avons expliquer précédemment dans la section 3.4.3. La table 3.1 présente l'ensemble des variables utilisées dans notre algorithme avec leurs significations.

| Variable | Signification |
|------------------------------------|---|
| n_i | Noeud capteur i |
| n_j | Noeud capteur j voisin de i |
| $Netsize$ | Taille du réseau en terme du nombre de noeuds |
| d_{ij} | Distance entre n_i et n_j |
| d_i | Distance entre n_i et la station de base |
| $listeV_i$ | Liste des voisins du noeud i |
| $nbrV_i$ | Nombre de voisins du noeud i |
| NoeudsLocalisés | Les noeuds capteurs localisés |
| PositionsNoeuds | Emplacement de noeud capteur |
| P_c | Le noeud capteur le plus proche à la station de base |
| P_{First} | Le premier noeud frontière |
| P_p | Le noeud capteur le plus à gauche du premier noeud frontière |
| P_v | Le noeud capteur qui forme un angle minimal avec le premier noeud frontière |
| $argmin$ $\{Q(P_p, P_c, P_j)\}$ | L'angle formé par les noeuds P_p , P_c , P_j |
| $\{P_c, P_v\}$ | L'arête entre P_c et P_v |
| BV | Ensemble des noeuds frontière |
| BE | Ensemble des arêtes |

TABLE 3.1 – Table des notations

3.6 Évaluation des performances

Pour évaluer les performances de notre solution proposée, nous avons réalisé les simulations sous l'environnement de programmation Matlab, le tableau 3.2 illustre les différents paramètres de simulations et par la suite nous allons présenter les résultats obtenus sous forme d'un ensemble de graphes.

Algorithm 1 Découverte du réseau

- 1: A la réception d'un message d'initialisation de la SB par n_i
 - 2: diffuser Hello ;
 - 3: **while** n_i reçoit Hello de n_j **do**
 - 4: d_{ij} = distance entre n_i et n_j ;
 - 5: ajouter (n_j , d_{ij}) à $listeV_i$;
 - 6: Incrémenter $nbrV_i$;
 - 7: **end while**
 - 8: Envoyer la liste des voisins à la station de base par Dissimulation ;
-

Algorithm 2 Localisation des noeuds

- 1: NoeudsLocalisés = Null ;
 - 2: Utiliser GPS (n_1, n_2) ;
 - 3: Ajouter n_1, n_2 dans NoeudsLocalisés ;
 - 4: **for** i allant de 3 à $Netsize$ **do**
 - 5: **if** $n_1, n_2 \in listeV_i$ **then**
 - 6: Trilatération ($n_i, listeV_i$) ;
 - 7: Ajouter n_i dans NoeudsLocalisés ;
 - 8: **else**
 - 9: Utiliser GPS ;
 - 10: Ajouter n_i dans NoeudsLocalisés ;
 - 11: **while** $listeV_i$ contient au moins 3 noeuds de NoeudsLocalisés **do**
 - 12: Trilatération ($n_i, listeV_i$) ;
 - 13: Ajouter n_i dans NoeudsLocalisés ;
 - 14: **end while**
 - 15: **end if**
 - 16: **end for**
 - 17: Retourner $PositionsNoeuds$;
-

Algorithm 3 Découverte de la frontière

```

1:  $P_c \leftarrow$  Noeud avec  $d_i$  minimal;
2:  $P_{First} \leftarrow P_c$ ;
3:  $P_p \leftarrow$  Noeud situe à gauche de  $P_c$ ;
4:  $BV \leftarrow P_c$ ;
5:  $BE \leftarrow \emptyset$ ;
6: while  $P_v \neq P_{First}$  do
7:    $P_v \leftarrow \operatorname{argmin} \{Q(P_p, P_c, P_j)\}$ ;
8:    $BV \leftarrow BV \cup \{P_v\}$ ;
9:    $BE \leftarrow BE \cup \{\{P_c, P_v\}\}$ ;
10:   $P_p = P_c$ ;
11:   $P_c = P_v$ ;
12: end while
13: Retourner  $BV$  ,  $BE$ ;

```

3.6.1 Paramètres de simulation

| Paramètre | Valeur |
|-------------------------------|--------------|
| Taille du réseau | 100 noeuds |
| Zone de surveillance | 100m X 100m |
| Rayon de communication | 40m |
| Taille donnée Noeud | 8 bits |
| Taille donnée Station de base | 4 bits |
| Énergie résiduelle initiale | 3 Joules |
| Énergie électrique | 50 nJ/bit |
| Énergie empirique | 100 pJ/bit |
| Débit satellites GPS | 50 bits/s |
| Nombre satellites GPS | 4 |
| Fréquence de mobilité | (20% ,5 min) |

TABLE 3.2 – Les paramètres de simulation

Lors des simulations, nous avons pris un réseau composé de 100 noeuds capteurs déployés aléatoirement dans la zone de surveillance de 100 m X 100 m, le réseau est surveillé par une seul station de base située à l'extérieur. Nous avons réalisé 20 simulations pour

lesquelles nous avons pris la moyenne pour chacun des paramètres simulés. La portée de communication de tous les noeuds est de 40 m et ils échangent entre eux une donnée sur 8 bits, à chaque période de 5 min y'aura une mobilité de 20% des noeuds du réseaux et donc pendant ces périodes de mobilité les noeuds transmettent les informations captées vers la station de base pour qu'elle puisse mettre à jour la topologie du réseau et exécuter le protocole à nouveau.

Nous avons évalué la consommation d'énergie pour notre solution proposée en la comparant avec le protocole LPCN déjà présenté, sachant que pour notre solution l'énergie consommée représente l'énergie utilisée par tous les noeuds du réseau lors de la communication des messages entre eux à savoir l'énergie d'émission et l'énergie de réception, ainsi que l'énergie consommée par les noeuds qui utilisent le GPS, pour l'échange des messages de contrôle et aussi l'envoi des informations vers la station de base nous avons utiliser la technique de la dissimulation présentée précédemment pour permettre l'économie de l'énergie du réseau et dans le but d'élever la durée de vie de notre réseau. De l'autre coté, pour le protocole LPCN nous avons pris en compte que l'énergie de consommation GPS de tous les noeuds du réseau, vu que dans ce cas tous les noeuds sont équipés du GPS qui est à tous moment en état actif et consomme de l'énergie.

Nous avons initialisé l'énergie de chaque noeud à 3 Joules, puis pour le calcul de l'énergie consommée nous avons suivi le modèle Heinzelman [12], ce dernier est le modèle énergétique le plus utilisé dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, suivant lequel quand un noeud transmet une donnée de taille k bits sur une distance d en mètre il va consommé une énergie de transmission Et en Joule selon l'équation 3.1, où α présente l'énergie électrique que nous avons initialisé à 50 nJ/bit suivant [12], et β présente l'énergie empirique initialisée dans [12] à 100 pJ/bit, et dans le cas où un noeud reçoit une donnée de taille k bits il va consommer une énergie de réception Er en Joule selon 3.2.

$$Et = k * (\alpha + \beta * d) \tag{3.1}$$

$$Er = k * \alpha \tag{3.2}$$

La consommation d'énergie GPS dépend du nombre de satellites visibles que nous avons fixé à 4 satellites et aussi de leurs débit de réception que nous avons fixé à 50 bits/s dans l'environnement de notre réseau. Pour le protocole LPCN tous les noeuds consomment une énergie pour le GPS, mais dans notre contribution nous avons pris en considération le but de minimiser ce nombre de noeuds utilisant le GPS en incluant l'idée de la trilatération pour localiser les noeuds au lieu de le faire avec GPS.

Les simulations sont exécutées jusqu'à l'épuisement de l'énergie du premier noeud lorsque son énergie initiale sera toute consommée, à chaque période de mobilité calculer l'énergie résiduelle de chaque noeud pour le cas du protocole LPCN ainsi que pour la solution proposée pour pouvoir déduire le nombre de requêtes pouvant être envoyées, puis par la suite calculer la durée de vie du réseau qui est l'un des aspects majeurs dans les réseaux de capteurs sans fil suivant le nombre de requêtes envoyées par les noeuds capteurs, la consommation d'énergie influence la durée de vie et comme notre solution son but principal est de minimiser la consommation d'énergie donc notre contribution permet une durée de vie plus que celle du réseau dans le cas du protocole LPCN.

3.6.2 Résultat obtenus

La figure 3.4 représente la consommation d'énergie du protocole LPCN et de la solution proposée en fonction du temps pour 100 noeuds, nous avons réalisé 20 simulations pour pouvoir prendre la moyenne de résultats obtenus et évaluer notre solution, la consommation d'énergie influence la durée de vie du réseau tel que nous remarquons que la durée de vie dans le cas du protocole LPCN est environs 5000 min qui est équivalent à plus de 83 heures ce qui donne 3 jours de vie pour le réseau, avec la solution proposée la durée de vie du réseau est bien claire qu'elle est plus longue elle atteint environs 20000 min qui est équivalent à 333 heures et qui donne jusqu'à 13 jours de vie pour le réseau. La consommation d'énergie qui est plus élevée dans le cas du protocole LPCN est dû à l'utilisation du GPS par tous les noeuds, par contre dans la solution que nous avons proposé le réseau consomme moins d'énergie ce qui lui offre une durée de vie de plus, ceci grâce à la dissimulation des messages communiqués à la station de base et aussi la localisation des noeuds par la trilatération ce qui a permet de minimiser le nombre de noeuds qui utilisent le GPS et réduire la consommation d'énergie.

Notant que l'environnement du réseau est mobile chaque période de 5 min et en comparant entre la consommation d'énergie entre le protocole LPCN et notre contribution nous pouvons conclure le bénéfice de notre solution tel qu'elle a permit d'augmenter la durée de vie du réseau en réduisant la consommation d'énergie. Comme nous remarquons que pendant la période du protocole LPCN l'énergie consommée atteint presque 300 Joules par rapport à l'énergie dans le cas de notre solution et pour la même durée qui est moins de 100 Joules, d'après cela nous pouvons conclure que notre solution permet de gagner jusqu'à 200 Joules d'énergie. De plus notre contribution à la fin de la durée de vie du réseau, l'énergie consommée atteint presque 300 Joules qui est équivalent à l'énergie initiale totale du réseau, d'après cela nous déduisons que notre solution garantie l'équilibrage des charges

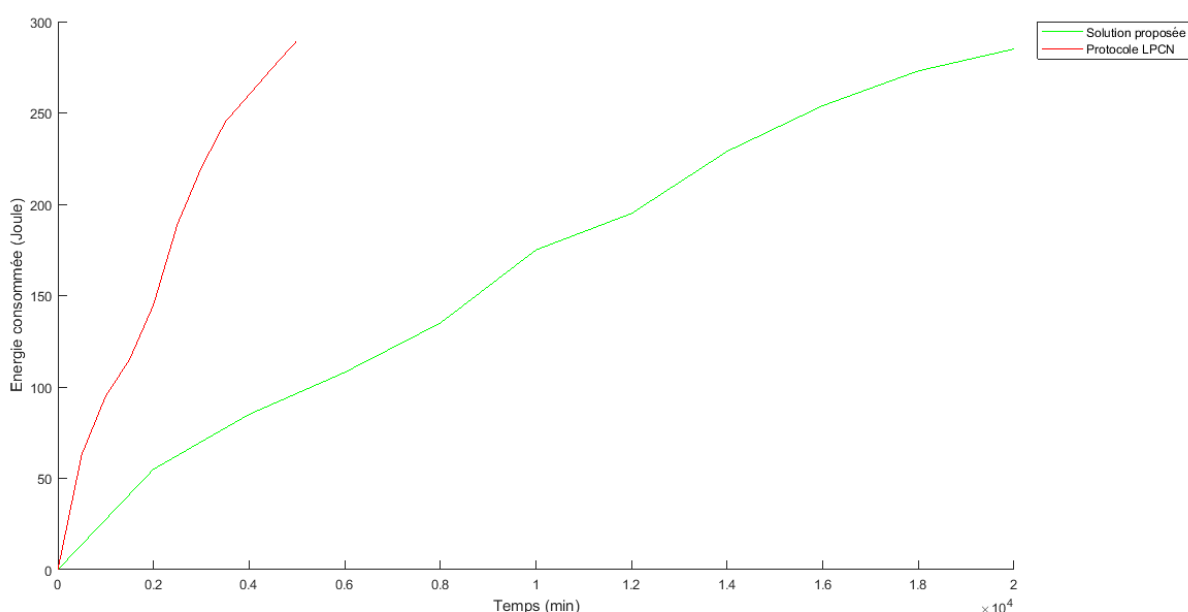


FIGURE 3.4 – Comparaison de l'énergie consommée

entre les noeuds en consomment leurs énergie, ce qui motive de plus notre contribution.

La comparaison de l'énergie consommée a été faite pour la taille du réseau égale à 100 noeuds, maintenant nous allons varier aussi le nombre de noeuds et revoir les résultats de l'énergie consommée en fonction du temps et de la taille du réseau, ceci est illustré par les deux figures **3.5** qui représente le cas du protocole LPCN et **3.6** pour le cas de notre solution proposée. D'après les deux figures nous remarquons que à chaque fois qu'on augmente le nombre de noeuds l'énergie consommée augmente tel que pour moins de 40 noeuds la consommations de l'énergie entre les deux cas est presque équivalente, après en augmentant la taille du réseau la différence de l'énergie consommée apparaît beaucoup plus pour plus de 100 noeuds comme nous l'avons illustré dans le graphes 3.4. Cette différence dans la consommation d'énergie est dû à la charge des communications entre les noeuds lorsque la taille du réseau est plus grande puisque notre solution se base sur la communication entre les noeuds, mais ça reste toujours moins que l'énergie consommée avec le protocole LPCN vu l'utilisation du GPS qui est trop gourmand en énergie, d'ailleurs c'est le point fort de notre contribution puisque nous avons diminué l'utilisation du GPS et donc minimiser la consommation d'énergie malgré que la communication entre les noeuds consomme de l'énergie mai notre solution a garantie l'équilibrage des charges entre les noeuds.

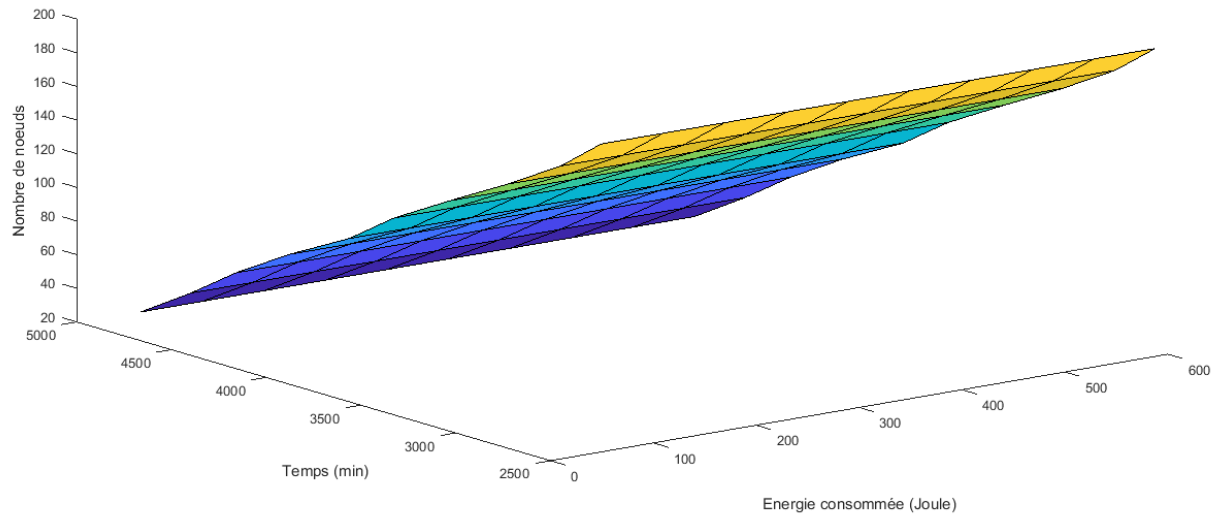


FIGURE 3.5 – L'énergie consommée par le protocole LPCN

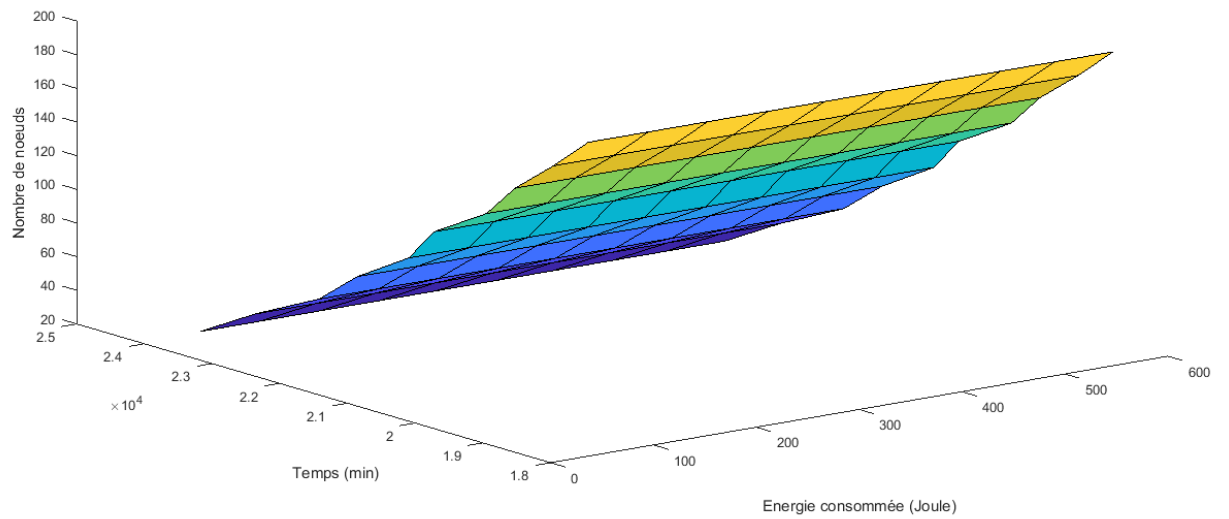


FIGURE 3.6 – L'énergie consommée par l'algorithme proposé

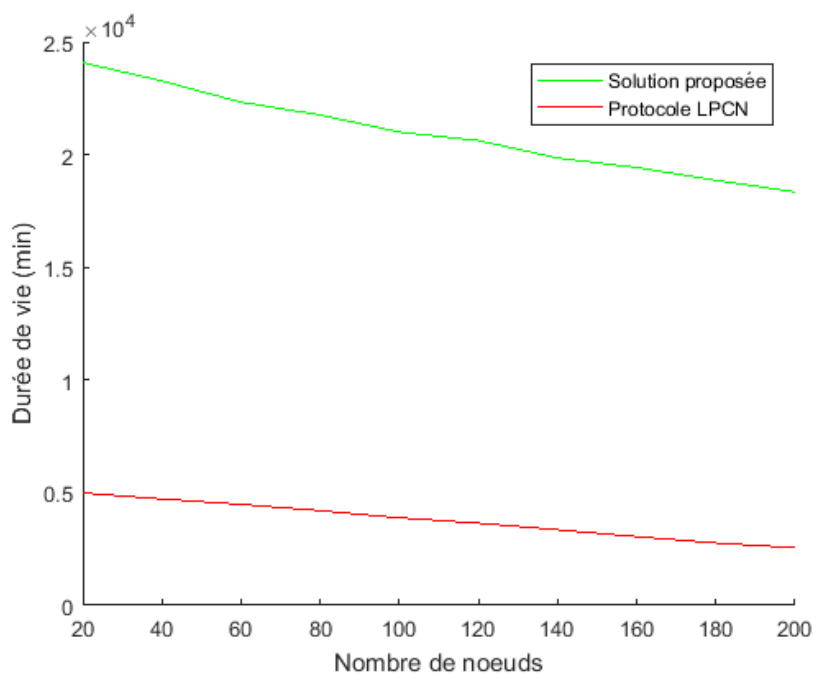


FIGURE 3.7 – Illustration de la durée de vie du réseau

La figure 3.7 illustre la durée de vie du réseau qui est équivalente au nombre de requêtes envoyées multiplié par la période entre les requêtes sachant qu'une requête est envoyée chaque 5 min. Nous remarquons une décroissance de la durée de vie du réseau dans les deux cas du protocole LPCN ainsi que de la solution proposée, ceci est dû à l'énergie consommée qui augmente avec le nombre de noeuds du réseau. En comparant entre le protocole LPCN et notre solution nous remarquons que la durée de vie du réseau dans le cas de notre solution est plus grande que celle du cas du protocole LPCN, ce dernier est plus coûteux en énergie à cause de l'utilisation du GPS par tous les noeuds, ce qui influence la durée de vie du réseau tel que montre le graphe elle est à environs 5000 min et diminue en augmentant le nombre de noeuds. Par contre la durée de vie du réseau avec la solution proposée atteint environs 25000 min, même quand la taille du réseau sera plus grande le réseau aura toujours une durée de vie importante, vu que notre contribution permet de minimiser la consommation d'énergie grâce à l'utilisation des deux principes de dissimulation lors de la communication entre les noeuds et la trilatération qui permet d'éviter l'utilisation du GPS, et donc faire élever la durée de vie du réseau.

La figure 3.8 représente le pourcentage des noeuds utilisant le GPS en fonction de la taille du réseau, nous remarquons qu'avec l'augmentation du nombre de noeuds du réseau

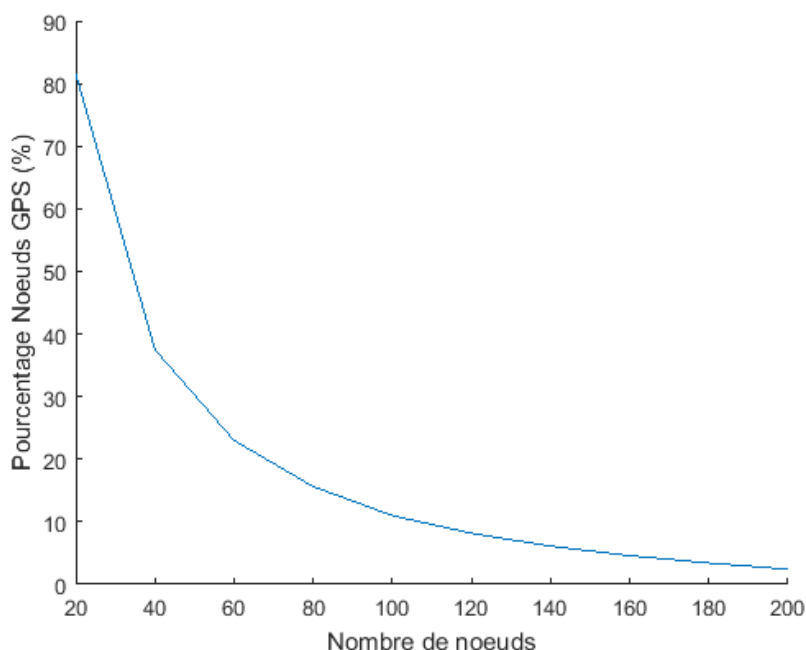


FIGURE 3.8 – Le pourcentage des noeuds utilisant le GPS selon la taille du réseau

le pourcentage des noeuds qui utilisent le GPS diminue. Suivant l'objectif principale de notre contribution qui consiste à minimiser le nombre de noeuds qui utilisent le GPS pour se localiser dans le réseau par rapport au LPCN où tous les noeuds sont localisés par GPS, l'utilisation de la trilatération nous a permis de réaliser cet objectif ce qui est bien claire d'après le graphe, notant que la trilatération se base sur la collaboration entre les noeuds voisins pour estimer l'emplacement des noeuds capteurs, d'après cela nous déduisons que l'augmentation de la taille du réseau donne plus de chance au noeuds de se localiser avec trilatération sans activer leurs GPS tel qu'à chaque fois que le nombre de noeuds dans le réseau est plus grand le degré de connectivité augmente ce qui donne lieu à utiliser la trilatération et éviter le GPS, par conséquent minimiser le nombre de noeuds avec GPS.

La figure 3.9 présente de sa part le pourcentage des noeuds qui utilisent le GPS pour leur localisation en fonction du rayon de communication. Avec une taille du réseau de 100 noeuds et comme montre le graphe, pour un rayon moins de 20 m plus de 50% des noeuds utilisent le GPS pour se localiser, puis en augmentant le rayon le pourcentage des noeuds avec GPS diminue, pour un rayon plus de 40 m le pourcentage des noeuds avec GPS atteint 10% et même moins quand le rayon augmente jusqu'à plus de 70 m. L'influence du rayon de communication sur l'utilisation du GPS par les noeuds est dû aussi à la connectivité

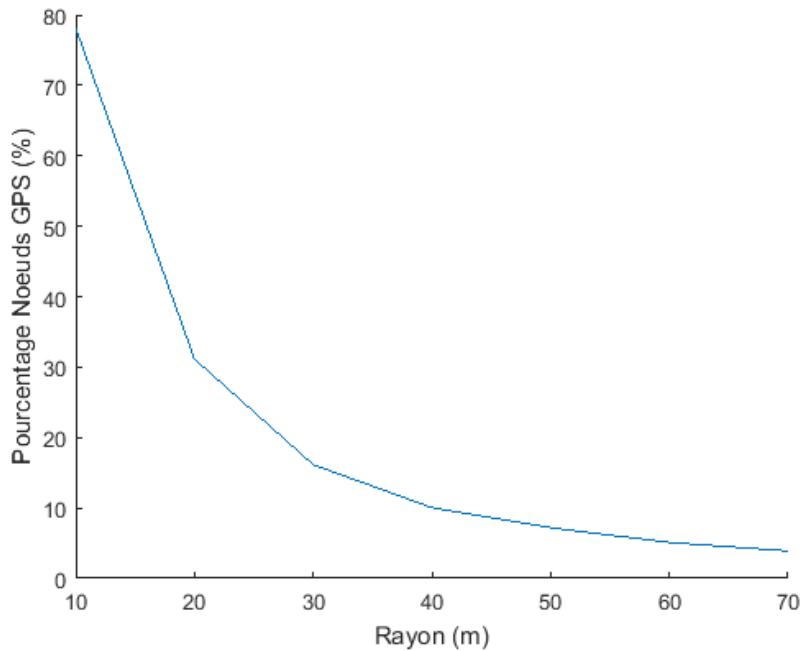


FIGURE 3.9 – Le pourcentage des noeuds utilisant le GPS selon le rayon de communication

entre les noeuds à savoir que pour un rayon petit les noeuds auront moins de voisins et il peuvent pas se localiser par trilatération ce qui oblige l'utilisation du GPS, de même à chaque augmentation du rayon de communication d'un noeud capteur se dernier aura plus de voisins et donc plus de chance pour se localiser par trilatération ce qui fait diminuer le nombre de noeuds qui utilisent le GPS.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre contribution qui consiste à l'amélioration du protocole LPCN pour la localisation des noeuds et la détection de la frontière dans les réseau de capteurs sans fil. Notre solution inclue les deux techniques, la dissimulation pour la communication des messages et la trilatération pour le calcul des positons en prenant en charge le changement topologique du réseau, puis appliquer le protocole LPCN pour la découverte de la frontière. L'avantage majeur de notre proposition est de permettre de réduire la consommation d'énergie par rapport au protocole étudié, en minimisant l'utilisation du GPS par les noeuds capteurs et l'échange des messages par dissimulation, ce qui a permis d'avoir une durée de vie plus importante pour le réseau.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons traité le problème de détection des frontières dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons proposé une nouvelle solution pour la localisation des noeuds frontières, qui permet d'améliorer un travail déjà existant en l'occurrence le protocole LPCN.

L'objectif de notre travail est l'amélioration du protocole LPCN de sorte à minimiser l'utilisation du GPS dans le processus de la localisation des noeuds capteurs. Pour cela, nous avons utilisé la technique de la trilatération qui permet l'estimation des emplacements des noeuds sans avoir besoin du GPS, cette technique se base sur la collaboration entre les noeuds capteurs du réseau. Cette solution a permis de réduire le nombre des noeuds qui utilisent le GPS en comparant avec l'utilisation du GPS dans le cas du protocole LPCN, ce qui a donné lieu à minimiser la consommation d'énergie dans le réseau. Comme une deuxième technique que nous avons utilisée dans notre solution, la dissimulation qui permet la communication des informations vers la station de base sans aucune consommation d'énergie supplémentaire. Notre contribution par l'utilisation des deux techniques de dissimulation et trilatération a pris en compte la contrainte énergétique des réseaux de capteurs sans fil, tel qu'elle a permis de minimiser la consommation d'énergie par rapport au protocole LPCN, ce qui est testé et validé d'après les simulations que nous avons réalisées. Les résultats des simulations montrent l'avantage de notre solution en terme de consommation d'énergie et qui implique l'avantage de garantir une durée de vie de plus pour le réseau ce qui prouve la validité de notre contribution.

Comme perspectives de recherches, nous envisageons de revoir la phase de découverte des frontières tout en gardant le principe de la trilatération pour la localisation des noeuds, comme l'axe est ouvert pour reprendre notre contribution sur la version distribuée du LPCN.

Bibliographie

- [1] Bournane Abbache, Sofiane Aissani, Mawloud Omar, Farah-Sarah Ouada, Nawel Yes-sad, Mohamed Azni, and Abdelkamel Tari. Dissimulation-based and load-balance-aware routing protocol for request and event oriented mobile wireless sensor networks. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 99 :264–283, 2019.
- [2] SARI Mounya Amal. Etude du rssi pour l’estimation de la distance dans les réseaux de capteurs sans fils, 2017.
- [3] LAHLOU Laaziz AMMAOUI Adel. Proposition et implémentation d’une approche géométrique pour la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil, 2012.
- [4] Abdelmalek BOUDRIES. *Maintien de la connectivité dans les Réseaux Ad hoc sans fil*. PhD thesis, Université Ferhat Abbas de Sétif 1, 2014.
- [5] Ahcène Bounceur, Madani Bezoui, Loïc Lagadec, Reinhardt Euler, Abdelkader Laouid, Mahamadou Traore, and Mounir Lallali. Detecting gaps and voids in wsns and iot networks : the minimum x-coordinate based method. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Future Networks and Distributed Systems*, page 37. ACM, 2018.
- [6] ABBACHE Bournane. *Localisation et routage dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université A.MIRA.BEJAIA, laboratoire d’informatique médicale LIMED, 2019.
- [7] Krishna Kant Chintalapudi and Ramesh Govindan. Localized edge detection in sensor fields. *Ad Hoc Networks*, 1(2-3) :273–291, 2003.
- [8] Jitender S Deogun, Saket Das, Haitham S Hamza, and Steve Goddard. An algorithm for boundary discovery in wireless sensor networks. In *International Conference on High-Performance Computing*, pages 343–352. Springer, 2005.
- [9] Oussama DRISSI. Implémentation d’une stratégie de routage multi-niveau de données d’un réseau de capteurs sans fil dans le domaine ferroviaire, juin 2014.

- [10] Stefan Funke. Topological hole detection in wireless sensor networks and its applications. In *Proceedings of the 2005 joint workshop on Foundations of mobile computing*, pages 44–53, 2005.
- [11] Stefan Funke and Christian Klein. Hole detection or : how much geometry hides in connectivity? In *Proceedings of the twenty-second annual symposium on Computational geometry*, pages 377–385. ACM, 2006.
- [12] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences*, pages 10–pp. IEEE, 2000.
- [13] Kun-Ying Hsieh and Jang-Ping Sheu. Hole detection and boundary recognition in wireless sensor networks. In *2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pages 72–76. IEEE, 2009.
- [14] Ijaz Muhammad Khan, Nafaâ Jabeur, and Sherali Zeadally. Hop-based approach for holes and boundary detection in wireless sensor networks. *IET Wireless Sensor Systems*, 2(4) :328–337, 2012.
- [15] Alexander Kröllner, Sándor P Fekete, Dennis Pfisterer, and Stefan Fischer. Deterministic boundary recognition and topology extraction for large sensor networks. *arXiv preprint cs/0510048*, 2005.
- [16] Raghavendra V Kulkarni and Ganesh Kumar Venayagamoorthy. Particle swarm optimization in wireless-sensor networks : A brief survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 41(2) :262–267, 2010.
- [17] Farid Lalem, Ahcène Bounceur, Madani Bezoui, Massinissa Saoudi, Reinhardt Euler, Tahar Kechadi, and Marc Sevaux. Lpcn : Least polar-angle connected node algorithm to find a polygon hull in a connected euclidean graph. *Journal of Network and Computer Applications*, 93 :38–50, 2017.
- [18] Ahmad Lhwani, Abed-Alrhman Mosallam, Aws Alawneh, Ahmed Awad, and Othman Othman. A low power boundary nodes detection algorithm for wireless sensor networks (wsns). In *Proceedings of the 3rd International Conference on Future Networks and Distributed Systems*, pages 1–8, 2019.
- [19] Robert Nowak and Urbashi Mitra. Boundary estimation in sensor networks : Theory and methods. In *Information processing in sensor networks*, pages 80–95. Springer, 2003.

- [20] Ali Rafiei, Mehran Abolhasan, Daniel Franklin, and Farzad Safaei. Boundary node selection algorithms in wsns. In *2011 IEEE 36th Conference on Local Computer Networks*, pages 251–254. IEEE, 2011.
- [21] Massinissa Saoudi, Farid Lalem, Ahcène Bounceur, Reinhardt Euler, M-Tahar Kechadi, Abdelkader Laouid, Madani Bezoui, and Marc Sevaux. D-lpcn : A distributed least polar-angle connected node algorithm for finding the boundary of a wireless sensor network. *Ad Hoc Networks*, 56 :56–71, 2017.
- [22] Amit Shirsat and Bharat Bhargava. Local geometric algorithm for hole boundary detection in sensor networks. *Security and Communication Networks*, 4(9) :1003–1012, 2011.
- [23] Feng Yan, Philippe Martins, and Laurent Decreusefond. Connectivity-based distributed coverage hole detection in wireless sensor networks. In *2011 IEEE Global Telecommunications Conference-GLOBECOM 2011*, pages 1–6. IEEE, 2011.

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil avec leur révolution dans les dernières années, ont fait l'objet de diverses recherches à propos des différentes problématiques imposées notamment la détection des frontières qui est l'objet d'étude traité tous au long de ce modeste mémoire. La solution proposée intègre principalement deux techniques à savoir la dissimulation qui résout le problème de la surcharge du réseau et la trilatération qui répond à la problématique de la localisation des noeuds, ceci permet de prendre en charge la contrainte énergétique en réduisant la consommation d'énergie dans le réseau.

Mots clés : *Réseaux de capteurs sans fil, frontières, localisation, dissimulation, trilatération, énergie*

Abstract

Wireless sensor networks with their revolution in recent years, have been the subject of various researches about the different issues imposed, in particular the detection of borders which is the subject of study dealt with throughout this modest thesis. The proposed solution mainly integrates two techniques namely dissimulation which solves the problem of network overload and trilateration which addresses the problem of location node. This makes it possible to take charge of the energy constraint by reducing energy consumption in the network.

Keywords : *Wireless sensor networks, borders, location, dissimulation, trilateration, energy*