

Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique
Département de Mathématiques et d'Informatique
Filière : Informatique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Informatique
Option : **Ingénierie des Systèmes d'Information**

THEME :

Algorithme distribué pour l'économie d'énergie dans
un réseau de capteurs sans fil

Etudiante : « **MALKI Meriem** »

Encadrant : « **BESSAOUD Karim** »

Résumé :

L'objectif de ce projet est de décrire des algorithmes existants dans la littérature scientifique pour l'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil pour préserver l'énergie dans de tels réseaux pour qu'ils durent le plus possible. Ainsi, de proposer et d'évaluer un algorithme distribué qui doit être auto-stabilisant qui permet d'avoir une tolérance aux pannes transitoires, et qui est notre solution pour la réduction de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil en réduisant l'énergie liée à la récolte de données.

Les réseaux de capteurs sont des réseaux de plus en plus utilisés dans différentes applications pour observer des zones et pour récupérer des informations sur l'environnement observé.

L'idée est de sélectionner un sous ensemble de capteurs qui couvrent une zone d'observation selon leurs couverture en terme de communication ou en terme de captage et qui maintiennent la connexité du réseau.

Nous allons commencer par décrire les composants d'un capteur ainsi que les facteurs influençant la conception d'un réseau de capteurs pour bien comprendre ce qui consomme de l'énergie dans un réseau de capteurs et la difficulté de concevoir une solution générique pour tous les réseaux de capteurs. Ainsi, nous allons présenter une classification des solutions existantes pour réduire la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

De plus, nous allons modéliser le réseau de capteurs sans fil en expliquant les différentes notions d'un graphe à partir lesquelles nous pouvons comprendre comment le système a été modélisé. Le graphe doit être un graphe de disques unitaires, non orienté, et connexe pour pouvoir le réduire en construisant un arbre de recouvrement pour la réduction de la consommation d'énergie dans le réseau de capteurs.

Ainsi, Nous allons implémenter le système en montrant comment nous avons construit ses différents composants. Nous allons vérifier aussi la connexité de notre graphe construit en utilisant un algorithme spécifique et décrire les différents modes d'un capteur.

En fin, nous allons passer à la description de l'application en présentant les outils de programmation utilisés.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil, économie d'énergie, algorithmique distribuée, graphes, tolérance aux pannes.

Dédicace

*A Ma très
chère mère*

Remerciements

Avant tous je remercie dieu le tous puissant de m'avoir donné le courage et la patience de mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur BESSAOUD Karim mon encadrant pour la qualité de son encadrement. Sa disponibilité et son attention au début et à la fin de ce mémoire ont été pour moi une aide précieuse et une source d'équilibre pour la réalisation de ce travail. Je tiens aussi à exprimer ma profonde reconnaissance pour ces conseils et orientations. Pour tout cela, je le remercie vivement.

Je tiens aussi à exprimer mes plus sincères remerciements à tous les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail.

Je dois une mention particulière à ma famille qui m'a toujours soutenue et a été toujours présente pour moi en particulier, mon père, mes sœurs, mon neveu Louey, ma nièce Alaa et spécialement ma chère maman, merci maman d'être toujours près de moi pour me soutenir et m'encourager.

Je remercie mon meilleur ami Mehdi qui n'a pas cessé de m'encourager et pour son aide précieuse, je lui remercie du plus profond de mon cœur.

Un grand merci aussi à tous ceux qui m'ont aidé et à tous ceux qui m'ont contribué à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Les réseaux de capteurs sans fil	3
1.1 Introduction	3
1.2 Composants d'un capteur	3
1.3 Etats d'un capteur	4
1.4 Topologies d'un réseau de capteurs sans fil	4
1.4.1 Réseau maillé	4
1.4.2 Réseau en étoile	5
1.4.3 Réseau hybride étoile-maillé	5
1.5 Applications des réseaux de capteurs sans fil	6
1.5.1 Dans le domaine de l'agriculture de pointe	6
1.5.2 Dans le domaine militaire	7
1.5.3 Dans le domaine de la télémédecine	7
1.5.4 Dans le domaine de la surveillance de l'environnement	8
1.5.5 Dans le domaine de l'habitat et des villes intelligentes	8
1.5.6 Dans le domaine de l'industrie	8
1.6 Facteurs influençant la conception des réseaux de capteurs sans fil	9
1.7 Conclusion	10
2 L'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs	11
2.1 Introduction	11
2.2 Principales sources de consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil	12
2.3 Durée de vie d'un réseau de capteurs	13
2.4 Les classes de solutions pour les économies d'énergie	14
2.4.1 Routage efficace en énergie	14

2.4.2	Utilisation de la mobilité.....	15
2.4.3	Solution de contrôle de topologie.....	15
2.4.4	Techniques du Sommeil/Réveil.....	15
2.4.5	Techniques orientées données.....	16
2.4.6	Technique de la réduction de captage et de conversion numérique.....	16
2.5	Conclusion.....	17
3	Modélisation.....	19
3.1	Introduction.....	19
3.2	La modélisation d'un réseau de capteurs.....	19
3.3	Définitions.....	20
3.3.1	Graphe.....	20
3.3.2	Nœud.....	20
3.3.3	Lien.....	20
3.3.4	Graphes non orientés (ou symétriques).....	20
3.3.5	Graphe de disques.....	20
3.3.6	Graphe UDG (Unit Disk Graph).....	20
3.3.7	Chaîne.....	20
3.3.8	Longueur d'une chaîne.....	20
3.3.9	Distance.....	20
3.3.10	Graphes connexe.....	21
3.3.11	Cycle.....	21
3.3.12	Graphe sans cycle (acyclique).....	21
3.3.13	Arbre.....	21
3.3.14	Arbre de recouvrement (spannigtree).....	21
3.3.15	Lien entre graphe non orienté et arbre.....	21
3.4	Algorithme distribué.....	21
3.5	Auto-stabilisation.....	21
3.5.1	Définition d'auto-stabilisation.....	22
3.5.2	Définition formelle d'auto-stabilisation.....	22
3.6	Conclusion.....	22

4 Implémentation	23
4.1 Introduction	23
4.2 Implémentation du réseau	23
4.2.1 Création du graphe	23
4.2.2 Création des nœuds	24
4.2.3 Création des disques de communication	24
4.2.4 Création des disques de captage	24
4.2.5 Création des liens	24
4.2.6 Liste de voisinage	24
4.3 Vérification de la connexité du graphe	24
4.3.1 Définition de parcours en largeur	25
4.3.2 Algorithme de parcours (en largeur) du graphe	25
4.4 Couverture	26
4.4.1 Couverture en terme de communicatio	26
4.4.2 Couverture en terme de captage	26
4.5 Description des modes d'un capteur	26
4.5.1 Mode sonde	26
4.5.2 Mode actif	26
4.5.3 Mode inactif	26
4.5.4 Mode mort	26
4.6 Algorithme distribué et auto-stabilisant de réduction d'énergie dans un réseau de capteurs sans fil	27
4.6.1 Algorithme auto-stabilisant de construction d'arbre	27
4.6.2 Explication de l'algorithme de construction d'arbre de recouvrement	28
4.6.3 Explication de notre algorithme	28
4.7 Conclusion	29
5 Description de l'application	31
5.1 Introduction	31
5.2 Les outils de programmation	31
5.2.1 Choix du langage de programmation	31
5.2.2 Choix de la plateforme de développement	32

5.3 Description de l'application.....	32
5.4 Les interfaces graphiques de l'application.....	32
5.4.1 L'interface de saisie.....	32
5.4.2 L'interface principale.....	33
5.4.3 Fonctionnalités des différents boutons.....	34
5.4.3.1 Bouton 1 : Réseau complet avec les disques de communication.....	34
5.4.3.2 Calcul des taux.....	34
5.4.3.3 Bouton 2: Réseau complet avec les disques de captage.....	36
5.4.3.4 Bouton 3: Réseau complet avec les liens de communication.....	36
5.4.3.5 Bouton 4: Réseau réduit avec les disques de communication.....	37
5.4.3.6 Bouton 5: Réseau complet réduit avec les disques de captage.....	38
5.4.3.7 Bouton 6: Réseau réduit avec les liens de communication.....	39
5.5 Tableaux des résultats	39
5.6 Interprétation des résultats.....	44
5.7 Conclusion.....	44
Conclusion générale.....	45
Bibliographie.....	47

Liste des Figures

Figure 1.1 : La relation entre les composants d'un capteur.....	4
Figure 1.2 : Topologie des réseaux maillés.....	5
Figure 1.3 : Topologie des réseaux en étoile.....	5
Figure 1.4 : Topologie des réseaux hybrides étoile-maillé.....	6
Figure 1.5 : Applications des réseaux de capteurs sans fil dans les différents domaines.....	7
Figure 5.1 : La fenêtre de la saisie de l'application.....	32
Figure 5.2 : La fenêtre d'affichage de message d'erreur.....	33
Figure 5.3 : La fenêtre principale de l'application.....	34
Figure 5.4 : Réseau complet avec les disques de communication.....	35
Figure 5.5 : Calcul des taux des couvertures.....	35
Figure 5.6 : Réseau complet avec les disques de captage.....	36
Figure 5.7 : Réseau complet avec les liens de communication.....	37
Figure 5.8 : Réseau réduit avec les disques de communication.....	38
Figure 5.9 : Réseau réduit avec les disques de captage.....	38
Figure 5.10 : Réseau réduit avec les liens de communication.....	39

Liste des Tableaux

Figure 5.11:Tableau des résultats pour 200 nœuds	40
Figure 5.12:Tableau des résultats pour 300 nœuds	41
Figure 5.13:Tableau des résultats pour 400 nœuds	42
Figure 5.14:Tableau des résultats pour 500 nœuds	43

Introduction Générale :

Un réseau de capteurs sans fil consiste en un grand nombre de capteurs qui sont déployés sur une zone géographique pour surveiller des phénomènes physiques tels que la température, l'humidité, les vibrations, etc. Les spécificités les plus importantes des capteurs sont leurs capacités d'auto-organisation, leur rapidité de déploiement, leur tolérance aux pannes et leur faible coût. Il existe plusieurs limites imposées aux capteurs telles que la limitation des capacités de traitement, de stockage et surtout d'énergie. Chaque capteur du réseau est équipé d'une batterie, qu'il est généralement très difficile de changer ou de recharger. Donc, à l'épuisement de sa batterie, un capteur est considéré comme mort.

La question cruciale est donc la suivante: "Comment économiser l'énergie pour que la durée de vie du réseau soit la plus grande possible?".

L'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil est utilisée pour le traitement, la transmission et la réception des messages. En outre, une grande quantité d'énergie est gaspillée en raison de la nature du milieu partagé sans fil, comme l'écoute inactive, l'écoute abusive, les collisions, etc.

L'énergie est une ressource très importante dans les réseaux de capteurs et doit être gérée pour prolonger la durée de vie des capteurs pendant la durée d'une mission particulière.

Par conséquent, maximiser la durée de vie du réseau en minimisant l'énergie est un défi important dans les réseaux de capteurs sans fil.

L'utilisation efficace des ressources énergétiques des capteurs, la conservation de l'énergie et la maximisation de la durée de vie du réseau ont été et restent la principale considération de conception pour les protocoles et les algorithmes proposés pour les réseaux de capteurs. Elles constituent l'un des critères de performances pour les réseaux de capteurs sans fil.

C'est pour cela que nous avons dressé un panorama des techniques, des protocoles et des solutions de conservation d'énergie proposées afin de prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs.

Malgré les nombreux travaux existants dans ce domaine et les nombreux progrès qui ont été effectués, la durée de vie de ces dispositifs continue d'être un défi majeur et un facteur clé, exigeant davantage de recherches sur l'efficacité énergétique des réseaux de capteurs sans fil.

En effet, chaque application à ses propres contraintes, il est donc impossible de trouver des algorithmes génériques qui fonctionnent quelle que soit l'application.

Dans ce qui suit, nous allons modéliser un réseau de capteurs sans fil par un graphe de disques unitaire (UDG) non orienté et connexe. La modélisation va se faire par des entités qui sont les nœuds ou les capteurs et des liens qui sont les arêtes pour représenter les communications sans fil entre ces nœuds. Donc on a toujours besoin de modéliser un graphe pour décrire notre système.

De plus, nous allons implémenter notre application pour créer notre réseau de capteurs.

Sachant que les capteurs sont dispersés dans la zone d'observation, ils peuvent récupérer les informations sur l'environnement physique. Cette zone doit assurer une couverture en terme de captage et en terme de communication ce qui fait un réseau constitué d'une seule composante connexe. La durée de vie d'un réseau de capteurs est liée à ces deux couvertures.

Ainsi, nous allons décrire notre solution par un algorithme distribué et auto-stabilisant qui va réduire la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

A la fin de ce projet, nous allons donner une description détaillée sur la réalisation de l'application et les outils utilisés, et expliquer aussi le principe de fonctionnement de l'application via ses différentes interfaces implémentées.

Chapitre 1 : Les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction :

Un réseau de capteurs sans fil est une collection de capteurs organisés en un réseau coopératif, il consiste généralement en une station de base (ou sink) qui peut communiquer avec un certain nombre de capteurs sans fil via une liaison radio. Les données sont collectées par les capteurs, et transmises au sink directement ou, si nécessaire, en multi-sauts en passant par d'autres capteurs.

Les réseaux de capteurs sans fil visent à offrir des capacités pratiques. De plus, les capteurs sont de plus en plus petits et de moins de moins chères, ce qui fait que leur utilisation ne cesse d'augmenter et ceci dans de nombreux domaines qu'ils soient militaire, environnemental, industriel, etc.

1.2 Composants d'un capteur :

Les capteurs peuvent être composés de plusieurs composants selon l'application et les objectifs du réseau, par contre, ils ont tous une structure commune et les composants suivants (voir figure 1.1) :

- **Une unité de traitement et de stockage** : utilisée pour stocker des informations et pour faire des calculs.
- **Une unité de détection**: utilisée pour capter des phénomènes physiquement mesurables.
- **Une technologie sans fil /unité de communication** : cette unité est responsable de toutes les émissions et les réceptions de données via un support de communication sans fil.

- **Un convertisseur numérique** : pour convertir des signaux analogiques fournis par les capteurs en un certains formats numériques et les transmettre à l'unité de traitement.
- **Une batterie** : c'est la source d'énergie des capteurs.

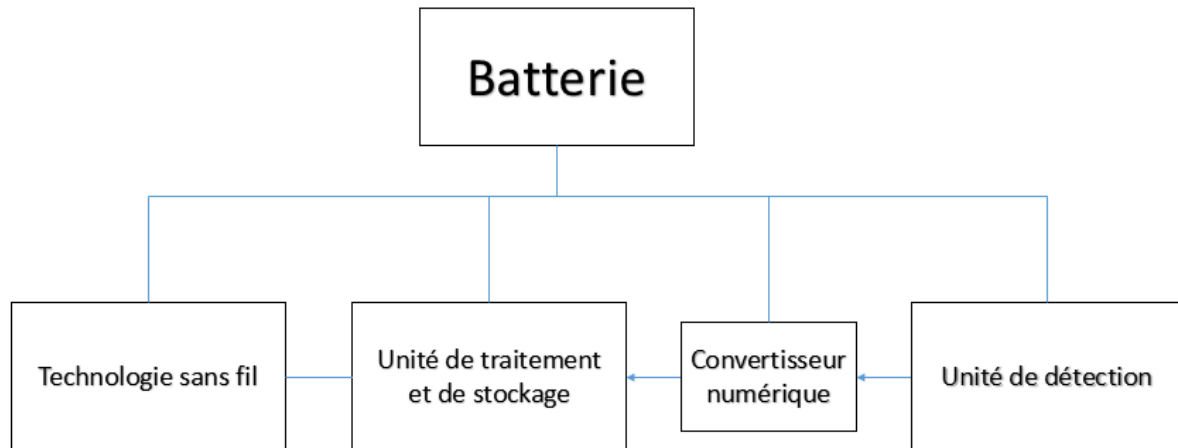


Figure1.1 : La relation entre les composants d'un capteur

1.3 Etats d'un capteur :

Les capteurs utilisent une technologie sans fil pour les communications, et selon le cas ils peuvent être dans un des états suivant :

- **L'état actif** : le capteur est dans cet état quand il transmet ou reçoit un message.
- **L'état Idle** : le capteur est seulement à l'écoute du réseau pour éventuellement recevoir un message. Lorsque le capteur est dans cet état, bien qu'il ne transmette pas et ne reçoit pas de message, il consomme de l'énergie pour l'écoute du réseau.
- **L'état veille** : le capteur est en veille. La technologie sans fil utilisée est désactivée afin d'économiser sa batterie.

1.4 Topologies d'un réseau de capteurs sans fil :

Il existe plusieurs topologies pour les réseaux de capteurs sans fil tel que : réseau maillé, réseau en étoile et réseau hybride étoile-maillé.

1.4.1 Réseau maillé :

Les capteurs sont généralement dispersés dans la zone d'observation.

Un réseau de capteurs sans fil est souvent composé de deux types de nœuds : les capteurs sans fil et le sink comme les montre la figure 1.2 tels que :

Les capteurs sans fil ont la capacité de collecter des informations relatives à leur environnement immédiat, de faire si nécessaire des traitements et de les transmettre vers le

sink. Si un capteur veut envoyer un message au sink ou à un autre capteur qui est hors de sa portée de transmission, il peut utiliser des capteurs intermédiaires pour transmettre le message à la destination.

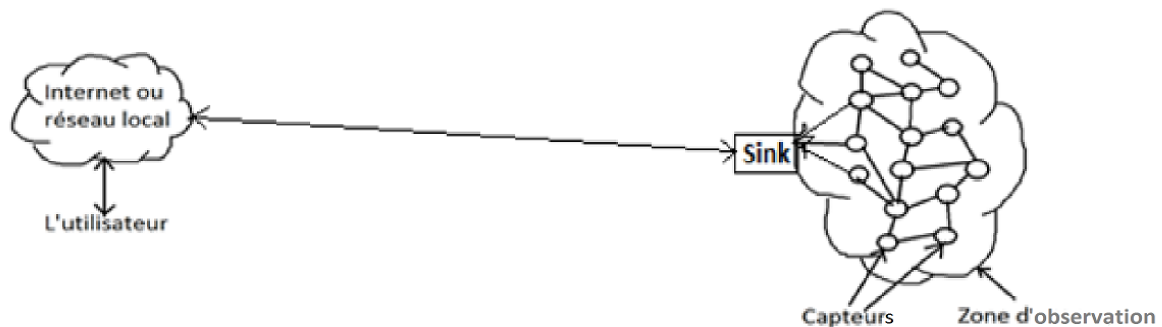


Figure 1.2 : Topologie des réseaux maillés

1.4.2 Réseau en étoile:

Un réseau en étoile est une topologie de communications où le sink peut envoyer et /ou recevoir des messages des capteurs. Ces derniers peuvent aussi envoyer ou recevoir des messages du sink, par contre ils ne traitent pas les messages des autres capteurs même s'ils les reçoivent. Voir la figure 1.3.

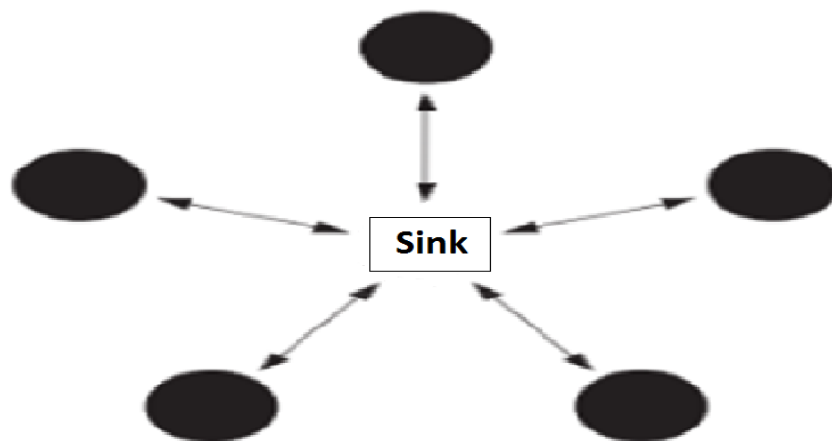


Figure 1.3 : Topologie des réseaux en étoile

1.4.3 Réseau hybride étoile-maillé :

Un réseau hybride est un réseau qui mixe les caractéristiques d'un réseau en étoile et d'un réseau maillé pour assurer une communication robuste. Dans cette topologie, il y a deux types de capteurs : des capteurs de faibles puissances et des capteurs de forte puissance de transmission. Les capteurs de faibles puissances sont reliés aux capteurs de forte puissance en

formant plusieurs réseaux en étoile qui sont à leur tour reliés pour former un réseau maillé comme le montre la figure 1.4.

Les capteurs de faible puissance permettent de maintenir une consommation d'énergie minimale car ils vont communiquer uniquement avec un seul capteur et vont faire un minimum de traitement. Les capteurs les plus puissants disposent généralement d'une source d'énergie externe en étant souvent branchés sur le réseau électrique et vont faire les traitements et transmettre les messages au sink.

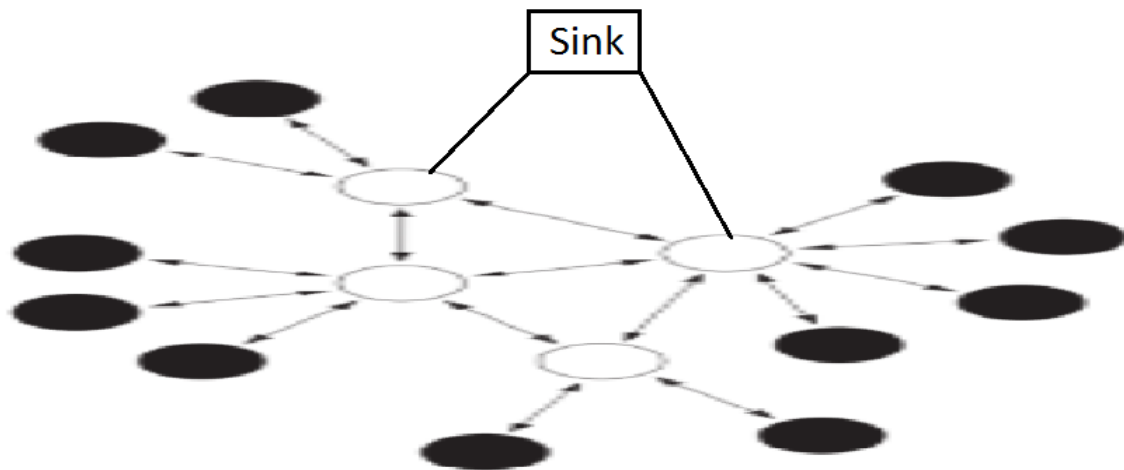


Figure 1.4 : Topologie des réseaux hybrides étoile-maillé

1.5 Applications des réseaux de capteurs sans fil :

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent couvrir une large palette d'applications, grâce à leur faible coût d'acquisition, leur déploiement et leur aptitude à s'auto-organiser et s'auto-maintenir. La figure 1.5 illustre quelques applications que nous développerons dans ce qui suit dans différents domaines. Vous trouverez dans [1], plus de détails sur les applications des réseaux de capteurs sans fil.

1.5.1 Dans le domaine de l'agriculture de pointe :

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés dans le domaine de l'agriculture pour l'observation du climat, des cultures et des caractéristiques du sol dans les zones de cultures, la fertilisation des sols et l'irrigation des sols ainsi que l'irrigation des sols par l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil avec les méthodes récentes telles que l'irrigation par goutte-à-goutte, par rampe arroseur ou center pivot qui permettrait une utilisation efficace de l'eau dans les zones de culture[2].

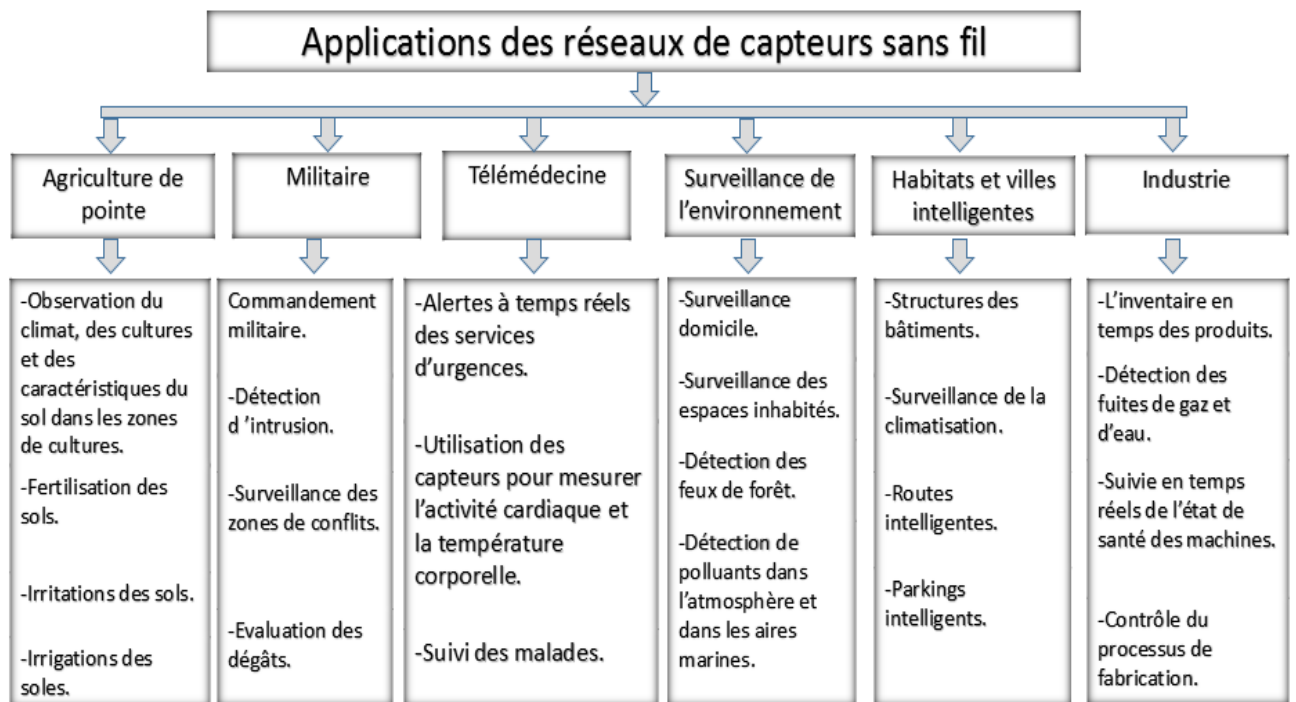


Figure 1.5 : Applications des réseaux de capteurs sans fil dans les différents domaines

1.5.2 Dans le domaine militaire :

La facilité de déploiement des capteurs, l'auto-configuration et l'auto-maintenance font que les réseaux de capteurs sans fil sont très adaptés pour les applications militaires. Tel que ce type de réseau peut être intégré dans le commandement militaire, les systèmes de contrôle, la communication, le calcul, les renseignements, la surveillance et le ciblage, la détection d'intrusion, la surveillance des zones de conflits et l'évaluation des dégâts [3].

1.5.3 Dans le domaine de la télémédecine :

Le déploiement de réseaux de capteurs sans fil peut être utilisé pour des alertes à temps réels des services d'urgences. L'intégration des systèmes micro-électromécanique a favorisé l'utilisation de nouveaux termes, parmi lesquels les ceintures intelligentes [4]. De tels dispositifs sont souvent dotés de capteurs de mouvement pour suivre les déplacements, tel que chaque capteur de mouvement a son importance en ce qui concerne la rapidité des interventions des services d'urgences en cas d'incidents, des capteurs positionnés au niveau du cœur pour mesurer l'activité cardiaque, des capteurs de température pour mesurer la température corporelle. Cette technologie vient en aide à la médecine pour le suivi des personnes âgées, des enfants, et surtout des personnes ayant une maladie chronique [5].

1.5.4 Dans le domaine de la surveillance de l'environnement :

Les réseaux de capteurs sans fil sont utiles pour la surveillance environnementale.

Deux volets peuvent être notés dans ce domaine: la surveillance domicile (indoor) avec la mesure de la qualité de l'air dans les immeubles, et la surveillance des espaces extérieurs (outdoor) pour la détection des tremblements de terre, des irrptions volcanique, des feux de forêt, des inondations, etc. [6]. Ce type de réseau peut servir de système d'alerte pour les feux de forêt, la détection de polluants dans l'atmosphère et dans les aires marines.

1.5.5 Dans le domaine de l'habitat et des villes intelligentes :

Les réseaux de capteurs sans fil sont très présents dans les habitations et les villes intelligentes. Les capteurs déployés dans les habitations peuvent servir pour plusieurs applications telles que : le contrôle de la structure des bâtiments, la gestion des stocks dans les commerces, la surveillance des trafics dans les transports, la surveillance de la climatisation, du chauffage, etc.

On présente ci-dessous deux applications concrètes dans ce domaine.

- Routes intelligentes [7] : pour prévenir les conducteurs de véhicules sur l'état des routes, de la circulation et des éventuels dangers. Cela permettrait de réduire considérablement le nombre d'accidents sur les routes mais aussi à baisser le taux d'émission de gaz polluants des véhicules en évitant les embouteillages.

- Parkings intelligents [8] : de tels réseaux ont été déployés dans plusieurs villes parmi lesquelles Santander en Espagne (Smart Santander), Nice en France et la gare de Lyon. Grâce à ces réseaux de capteurs sans fil, les conducteurs de véhicules pourront localiser très rapidement, à partir de leur situation géographique, le parking le plus proche et ainsi économiser l'énergie qui pourra être consommée à cause des grands tours à la recherche d'un parking.

1.5.6 Dans le domaine de l'industrie :

Les réseaux de capteurs sans fil permettent de rendre de plus en plus intelligente l'industrie. Ils permettent aujourd'hui d'automatiser certaines tâches telles que l'inventaire en temps réels des produits, la détection des fuites de gaz et/ou d'eau [9], la suivie en temps réels de l'état de santé des machines, le contrôle du processus de fabrication, etc. [10].

1.6 Facteurs influençant la conception des réseaux de capteurs sans fil :

La conception d'un réseau de capteurs sans fil est influencée par de nombreux facteurs [11, 12] qui peuvent servir de guide pour concevoir un protocole ou un algorithme pour les réseaux de capteurs sans fil, tels que :

- **Communication** : les communications dans les réseaux de capteurs sans fil se heurtent aux problèmes liés aux communications sans fil tels que la présence d'obstacles dans l'environnement à surveiller.
- **Environnement** : les capteurs peuvent être déployés dans des endroits très divers tels que des champs de bataille, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiques ou chimiques. Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner dans des régions géographiques éloignées ou difficiles d'accès.
- **Déploiement topologique des capteurs** : le déploiement est soit déterministe ou auto-organisé. Dans des situations déterministes, les capteurs sont placés manuellement et les données sont acheminées par des trajets prédéterminés. Cependant, dans les systèmes d'auto-organisation, les capteurs sont dispersés de manière aléatoire.
- **Tolérance aux pannes** : dans le cas de dysfonctionnement d'un capteur (manque d'énergie par exemple) qui nécessite un changement de la topologie du réseau ou aussi en cas d'ajout de nouveaux capteurs dans le réseau, le réseau de capteurs doit continuer à fonctionner normalement sans interruption. Ceci explique le fait qu'un réseau de capteurs sans fil n'adopte pas de topologie fixe mais plutôt dynamique.
- **Coûts de production** : souvent les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de capteurs. Le prix d'un capteur est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel.
- **Densité** : généralement très dense (très grand nombre de capteurs déployés à travers la zone d'intérêt), les réseaux de capteurs sans fil sont souvent sujet à des pannes récurrentes qui sont soit natives (défaut de fabrication) ou accidentelles (épuisement de la batterie). Tout cela fait que la topologie de tels réseaux est très changeante. Le réseau doit continuer à fonctionner grâce à cette densité qui fait que les parties de la zone d'observation sont couvertes par plusieurs capteurs.
- **Supports de transmission sans fil** : dans un réseau de capteurs, les capteurs sont reliés par une architecture sans fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être standardisé. Les technologies

utilisées sont l'infrarouge, le Bluetooth, le Wifi mais la technologie la plus souvent utilisée reste le Zig Bee.

- **Réserve énergétique :** dans la plupart des cas, le capteur fonctionne sur batterie d'où une capacité énergétique limitée et sa validité est étroitement liée à la capacité de la batterie. Ce qui fait que souvent le capteur est considéré comme « mort » si sa batterie est épuisée et ainsi l'utilisation de l'énergie doit être soigneusement suivie pour assurer une fonctionnalité optimale du capteur tout au long de la vie du réseau.
- **Capacité de traitement :** à cause des faibles coûts, de la taille et du fonctionnement sur batterie, les capteurs sans fil sont très limités en termes de capacité de traitement.

1.7 Conclusion :

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de communication, cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil, leurs différentes topologies, leurs diverses applications etc. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs facteurs compliquent la gestion de ce type de réseaux. En effet, la taille des capteurs constitue une limitation importante, ce qui implique que la batterie doit être très petite et donc la durée de vie d'un capteur est limitée, ce qui fait de la consommation d'énergie, un problème majeur dans les réseaux de capteurs sans fil.

Chapitre 2 :l'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs

2.1 Introduction

La durée de vie des réseaux de capteurs sans fil dépend principalement de la gestion énergétique des capteurs. L'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil est utilisée pour toutes les fonctionnalités des capteurs à savoir : la récolte des données, le traitement, la transmission et la réception des messages. En outre, une grande quantité d'énergie est gaspillée en raison de la nature du milieu partagé sans fil, comme l'écoute inactive, les collisions, etc.

Les capteurs fonctionnent avec un processeur et une radio. Ils se caractérisent par des ressources limitées en termes de mémoire, de calcul et d'énergie. La batterie des capteurs est habituellement difficile à recharger ou même à remplacer. L'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil est donc une ressource rare et précieuse qui doit être préservée. Ils existent plusieurs protocoles qui traitent cette problématique.

Les problèmes majeurs dans l'élaboration de protocoles pour économiser de l'énergie dans les réseaux de capteurs est la diversité des applications ainsi que l'existence de nombreux facteurs influençant la conception de réseaux de capteurs sans fil.

2.2 Principales sources de consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil [13]:

Les unités qui consomment de l'énergie sont l'unité de traitement et de stockage, l'unité de détection, la technologie sans fil ainsi que le convertisseur numérique comme montré dans la figure 1.1. Telle que, la consommation d'énergie peut être due à un ou plusieurs des faits suivants :

- **Les traitements et les calculs :** l'énergie de traitement représente la quantité d'énergie perdue pour le traitement des instructions mais aussi pour le fonctionnement des mémoires. Cette quantité d'énergie est négligeable devant celle dissipée par l'unité de communication. Il est néanmoins beaucoup plus judicieux de concevoir des solutions et algorithmes moins gourmands en mémoire et simples en termes de calcul pour une utilisation raisonnable de l'énergie. Le contrôle du réseau est une partie très importante dans les réseaux de capteurs du fait de la caractéristique d'auto-organisation de ces réseaux. Par contre, il doit être le moins gourmand possible en mémoire et en traitement.
- **La transmission de messages :** les capteurs consomment une grande quantité d'énergie pour les transmissions de messages. Les messages envoyés peuvent être des messages de contrôles ou des données récoltées par les capteurs. De plus, l'énergie consommée pour la transmission d'un message augmente de façon quadratique avec le rayon de transmission.
- **La réception de messages :** la réception de messages est l'une des principales sources qui conduit à la consommation d'énergie. L'énergie consommée dépend uniquement de la taille des messages.
- **L'écoute du canal :** le mode idle, c'est un mode durant lequel la radio reste allumée et qu'il n'y a aucun message à transmettre ou à recevoir. Cette état est une source non négligeable de consommation d'énergie mais est néanmoins moins gourmand que la transmission et la réception de messages. Cependant, si les communications sont rares, la perte d'énergie liée à l'écoute du canal peut s'avérer importante.
- **L'écoute abusive ou encore «overhearing» :** se produit lorsqu'un capteur reçoit des messages qui ne lui sont pas destinées. Cela peut engendrer une surconsommation importante d'énergie surtout dans le cas des réseaux très dense et à très fort trafic. En effet, lors d'un envoi de message, tous les capteurs qui sont à portée de transmission reçoivent le message, même s'ils ne sont pas destinataires du message.

- **La collision :** lorsqu'un capteur reçoit plus d'un message en même temps, ces messages sont appelés collés, même lorsqu'ils ne se coïncident que partiellement. Tous les messages qui provoquent la collision doivent être jetés et des retransmissions de ces messages sont nécessaires et augmentent donc la consommation d'énergie des capteurs qui émettent et qui reçoivent ces messages.
- **La récolte de données sur l'environnement (captage) :** généralement, l'énergie de capture représente un faible pourcentage de la consommation globale d'un capteur donné. Mais, selon les exigences de certaines applications, elle peut s'avérer non négligeable. Par contre, de par le fait de la densité des réseaux de capteurs sans fil, des mêmes données sur l'environnement peuvent être récoltées par plusieurs capteurs, ce qui va causer une perte d'énergie pour les récoltes et les transmissions de données redondantes.
- **La conversion numérique des données récoltées :** la conversion est étroitement liée à la récolte de données. Plus un capteur va récolter des données sur son environnement plus il va convertir. Donc, si on veut réduire l'énergie de la conversion, il faut réduire la récolte de données.

2.3 Durée de vie d'un réseau de capteurs :

La durée de vie d'un capteur dépend généralement de la durée de vie de sa batterie c'est-à-dire qu'un capteur est dit mort lorsque sa batterie s'épuise.

Un réseau ne peut accomplir son objectif que tant qu'il est en vie. Pour la durée de vie du réseau il existe plusieurs définitions parmi lesquelles:

- À la mort du premier capteur : C'est la durée jusqu'à ce que la première batterie s'épuise entre tous les capteurs, qui est la même que la durée de vie minimale de tous les capteurs.
- À la mort d'une fraction de capteurs : C'est la durée jusqu'à atteindre une certaine fraction de capteurs mort dans le réseau.
- À la partition du réseau : Définie comme étant le temps écoulé entre l'instant où le réseau commence son fonctionnement et l'instant où il n'est plus connecté (à cause de la défaillance d'un ou de plusieurs capteurs).

2.4 Les classes de solutions pour les économies d'énergie :

Dans les réseaux de capteurs, la consommation d'énergie est très importante puisque les capteurs sont généralement déployés dans des zones inaccessibles. De plus, il est difficile de remplacer les batteries après leur épuisement. De ce fait, la consommation d'énergie au niveau des capteurs a une grande influence sur la durée de vie du réseau. Dans la littérature de réseaux de capteurs sans fil, plusieurs classes de solutions et techniques ont été proposées pour augmenter la durée de vie du réseau telles que :

- Routage efficace en énergie
- Utilisation de la mobilité
- Solution de contrôle de topologie
- Techniques du Sommeil/Réveil
- Techniques orientées données
- Technique de la réduction de captage et de conversion numérique

2.4.1 Routage efficace en énergie :

Cette classe de solutions vise à minimiser l'énergie consommée par la transmission de bout en bout d'un message. Le routage permet de minimiser l'énergie en réduisant la quantité de messages transmis et reçus. L'intérêt récent pour les réseaux de capteurs a conduit à un certain nombre de schémas de routage. Ces schémas tentent généralement de trouver le chemin d'énergie minimum pour optimiser la consommation d'énergie à un capteur.

Le problème dans les protocoles actuels est qu'ils trouvent la voie la plus basse d'énergie. Toutefois, ce n'est pas la meilleure chose à faire pour la durée de vie du réseau. L'utilisation d'un chemin à faible énergie conduit fréquemment à l'épuisement énergétique des capteurs de ce chemin et dans le pire des cas peut conduire à la partition réseau.

Pour contrer ce problème, un nouveau protocole s'est proposé qui s'appelle le routage énergétique [14]. L'idée de base est que pour augmenter la capacité de survie des réseaux. Il peut être nécessaire d'utiliser des chemins sous-optimaux occasionnellement. Cela garantit que le chemin optimal n'est pas épuisé et le réseau se dégrade gracieusement dans son ensemble plutôt que de se partitionner. Pour ce faire, plusieurs chemins sont trouvés entre la source et les destinations, et chaque chemin est assigné une probabilité d'être choisi. Chaque fois que des données doivent être envoyées de la source à la destination, l'un des chemins est choisi au hasard en fonction des probabilités. Cela signifie qu'aucun des chemins n'est utilisé tout le temps, ce qui empêche l'épuisement énergétique.

L'acheminement à l'énergie diffuse le trafic sur le réseau. En conséquence, les capteurs au centre du réseau conservent l'énergie pendant plus longtemps.

2.4.2 Utilisation de la mobilité :

Le déplacement des capteurs rend la transmission plus dispersée et la gestion de l'énergie dépensée plus efficace. La mobilité permet d'éviter aux capteurs qui sont près du sink de perdre vite leurs énergies.

Dans les réseaux disjoints, ou quand un capteur statique meurt, les capteurs mobiles peuvent assurer une bonne couverture et une bonne connectivité dans le réseau. Ceci n'est pas possible avec les réseaux de capteurs statiques, dans lequel les données des capteurs morts ou déconnectés seraient tout simplement perdues.

Par ailleurs, lorsque les sinks du réseau sont stationnaires, les capteurs les plus proches des sinks épuisent vite leurs énergies, parce qu'ils doivent transmettre plus de messages de données que les capteurs éloignés. En utilisant les sinks mobiles, ce problème sera éliminé ainsi la durée de vie du réseau sera étendue [15].

2.4.3 Solution de contrôle de topologie :

Dans la classe de solution de contrôle de topologie, le rôle des capteurs est de réduire leur portée de transmission de telle sorte que le réseau reste connecté. Le but est de minimiser la consommation d'énergie due à la puissance d'émission, à l'écoute et à la collision, de telle manière d'éviter le partitionnement réseau.

En [16], un algorithme distribué et tolérant aux défaillances est proposé qui permet de réduire la puissance d'émission des capteurs tout en garantissant une topologie pour faciliter le routage. Dans ce but, un backbone virtuel est construit.

Un capteur qui n'est pas dans le backbone, appelé capteur dominé, choisit son voisin le plus proche dans le backbone pour être son dominateur. Ensuite, il réduit sa portée de transmission à la distance euclidienne entre son dominateur et lui-même.

Un capteur dans le backbone réduit sa portée de transmission pour atteindre tous ses voisins dans le backbone et tous ses voisins qu'il domine.

2.4.4 Techniques du Sommeil/Réveil :

Cette technique [13] est principalement utilisée dans l'activité réseau. Le moyen le plus efficace pour conserver l'énergie est de mettre la radio de l'émetteur en mode veille à chaque fois que la communication n'est pas nécessaire. Idéalement, la radio doit être éteinte dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et/ou à recevoir, et devrait être prête dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu. Ainsi, les capteurs alternent entre périodes actives et sommeil en fonction de l'activité du réseau. Comme les capteurs effectuent des tâches en coopération, ils doivent coordonner leurs dates de sommeil et de réveil. Un algorithme d'ordonnancement « Sommeil/Réveil » accompagne donc tout plan de mise en veille des capteurs.

Les protocoles sommeil/Réveil sont divisés en trois grandes catégories : à la demande, rendez-vous programmés, régimes asynchrones.

- **Protocoles à la demande :** les protocoles à la demande utilisent l'approche la plus intuitive pour la gestion d'énergie. L'idée de base est qu'un capteur devrait se réveiller seulement quand un autre capteur veut communiquer avec lui.
- **Protocoles de rendez-vous programmés :** l'idée d'une approche de rendez-vous programmés est que chaque capteur doit se réveiller en même temps que ses voisins. Typiquement, les capteurs se réveillent suivant un ordonnancement de réveil et restent actifs pendant un court intervalle de temps pour communiquer avec leurs voisins. Ensuite, ils se rendorment jusqu'au prochain rendez-vous.
- **Protocoles asynchrones :** avec les protocoles asynchrones, un capteur peut se réveiller quand il veut et tant qu'il est capable de communiquer avec ses voisins. Ce but est atteint par des propriétés impliquées dans le régime sommeil/Réveil, aucun échange d'informations n'est alors nécessaire entre les capteurs.

2.4.5 Techniques orientées données :

Les approches orientées données peuvent être utiles pour améliorer l'efficacité en énergie. Des techniques orientées données sont conçues pour réduire la quantité de données. Réduire les données en termes de volume ou de nombre de paquets dans les réseaux peut avoir un impact majeur sur la consommation d'énergie due à la communication. Parmi les méthodes de réductions de données, nous trouvons le traitement dans le réseau qui est présenté dans le document [17] et qui consiste à réaliser l'agrégation de données (par exemple, calculer la moyenne de certaines valeurs) au niveau des capteurs intermédiaires entre la source et le sink. Ainsi, la quantité de données est réduite tout en parcourant le réseau vers le sink. La compression de données peut être appliquée également pour réduire la quantité d'informations transmise par les capteurs sources.

2.4.6 Techniques de la réduction de captage et de conversion numérique :

La conversion numérique est liée au captage et la minimisation de la consommation d'énergie au niveau de la capture consiste à réduire les fréquences et les durées de captures.

- **Consommation électrique du module de détection :** si le capteur est lui-même très consommateur alors la réduction de la communication ne suffit pas. Il faut donc réduire la consommation d'énergie au niveau de la capture en réduisant à la récolte de donnée par le capteur pour que l'énergie de la conversion numérique soit réduite.

- **Echantillons inutiles** : les données échantillonnées ont souvent de fortes corrélations spatiales et/ou temporelle [18], il est donc inutile de communiquer les informations redondantes au sink. Tel qu'un échantillonnage inutile implique une consommation d'énergie à son tour inutile. Pour éviter ce problème l'agrégation de donnée c'est la solution.

2.5 Conclusion :

Dans les réseaux de capteurs sans fil où les capteurs ont sur une énergie limitée par leur batterie, l'utilisation efficace de l'énergie est très importante. La durée de vie des réseaux de capteurs sans fil dépend principalement de l'efficacité de l'utilisation de cette énergie.

Nous avons présenté dans ce chapitre les principales sources de consommation d'énergie, la durée de vie de réseau de capteurs ainsi que plusieurs protocoles de conservation d'énergie selon plusieurs classes de solutions. Beaucoup d'opérations des capteurs sont gourmands en énergie, c'est pour cette raison que les solutions sont nombreuses et diversifiées.

Chapitre 3 : Modélisation

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différents composants pour la modélisation de notre système qui est le réseau de capteurs sans fil. La modélisation identifie des entités et des dépendances entre ces entités telles que, les entités sont appelées les capteurs ou nœuds du système où on utilise des arêtes pour représenter les communications sans fil entre ces nœuds. Donc on utilise souvent le formalisme du graphe pour décrire la topologie de notre système.

Dans la zone d'observation, les capteurs peuvent récupérer les informations sur l'environnement physique. Cette zone doit assurer une couverture en terme de captage et en terme de communication ce qui fait un réseau constitué d'une seule composante connexe. La durée de vie d'un réseau de capteurs est liée à ces deux couvertures.

3.2 La modélisation d'un réseau de capteurs :

Nous avons modélisé le réseau de capteur sans fil par un graphe non orienté $G/G(V, E)$, dont V est l'ensemble des sommets représentant les nœuds (dans notre cas sont les capteurs) et $E(V \times V)$, l'ensemble des arêtes donnant les communications sans fil entre les nœuds du réseau.

3.3 Définitions :

Nous avons besoin de quelques définitions pour pouvoir comprendre la modélisation de notre système telles que:

3.3.1 Graphe : un graphe est une structure de données composées d'un ensemble de nœuds ou sommets, et d'un ensemble de relations entre ces sommets telles que des liens ou des arêtes. L'ensemble des arêtes entre ces nœuds forme une figure similaire à un réseau.

3.3.2 Nœud : un nœud est le sommet dans un graphe qui constitue un réseau. Chaque nœud a la même capacité d'émettre, de recevoir et de calculer que les autres nœuds de son réseau.

3.3.3 Lien : un lien est un segment permettant la liaison d'un nœud avec un autre dans un graphe (la communication). Dans le cas des graphes non orientés les liens sont symétriques et appelés des arêtes.

3.3.4 Graphes non orientés (ou symétriques) : un graphe non orientés est un graphe qui constitue d'un ensemble de sommets et d'un ensemble de relations symétriques (arêtes) entre ces sommets, les relations existent dans les deux sens.

On peut présenter les graphes non-orientés par des graphes orientés symétriques : pour tous sommets x et y , s'il existe un arc (x,y) , il existe aussi un arc (y,x) . Donc, s'il existe un chemin de x à y , il existe aussi un chemin de y à x .

3.3.5 Graphe de disques : c'est un graphe qui permet de modéliser les réseaux sans fil, dont lesquels les nœuds possèdent des antennes omni-directionnelles. Dans un graphe de disque, chaque nœud est centré dans un disque et possède un lien avec les nœuds qui sont dans son disque.

3.3.6 Graphe UDG (Unit Disk Graph) : un graphe de disque unitaire est un graphe de disque avec des nœuds qui possèdent des disques de taille unitaire, c'est-à-dire que tous les disques ont le même rayon ou tous les nœuds ont la même portée de transmission. Les sommets du graphe sont les stations sans fil, et deux sommets sont reliés si ces stations sont à portée de communications. Les graphes UDG sont des graphes non orientés car vu que tous les nœuds ont le même rayon alors si un nœud « a » est dans le disque du rayon « b » alors le nœud « b » est dans le disque du nœud « a ».

3.3.7 Chaîne : une chaîne d'un graphe est une liste ordonnée de sommets de ce graphe, telle que chaque sommet de la liste soit adjacent au suivant.

3.3.8 Longueur d'une chaîne : La longueur d'une chaîne est le nombre d'arêtes qui la compose.

3.3.9 Distance : la distance entre deux sommets d'un graphe est la plus petite des longueurs des chaînes qui les relient (dans notre cas, deux sommets sont reliés si la distance entre eux est inférieure ou égal au rayon de communication).

3.3.10 Graphe connexe : un graphe non orienté est dit connexe s'il ne contient qu'une seule composante connexe, c'est-à-dire qu'on peut aller de tout sommet vers tous les autres sommets où il existe une chaîne entre tout couple de sommets distincts.

3.3.11 Cycle : un cycle est une chaîne fermée composée d'arêtes toutes distinctes. On dit qu'une chaîne est fermée lorsque le sommet de départ et le sommet d'arrivée sont confondus. Dans un graphe non orienté, un cycle est une suite d'arêtes consécutives (chaîne) dont les deux sommets extrémités sont identiques.

3.3.12 Graphe sans cycle (acyclique) : un graphe sans cycle est un graphe non orienté dans lequel il n'y a pas de cycle.

3.3.13 Arbre : un arbre est un graphe non orienté, acyclique et connexe. On distingue deux types de sommets dans un arbre tels que les feuilles dont le degré est 1, et les nœuds internes dont le degré est supérieur à 1.

3.3.14 Arbre de recouvrement (spanningtree) : c'est un sous-graphe connexe, acyclique dont le nombre de sommets est égal au nombre d'arêtes + 1, tel qu'il existe un chemin reliant toutes les paires de sommets.

3.3.15 Lien entre graphe non orienté et arbre : Par définition, un arbre est un graphe connexe et sans cycle avec $(n-1)$ arêtes.

3.4 Algorithme distribué :

On peut définir un système distribué ou répartis comme un système qui englobe tous les systèmes composés de plusieurs entités autonomes : processus, ordinateurs, etc (capteurs dans notre cas). Chaque entité communique avec ses voisins via un système de communication (communication sans fil dans notre cas). Chaque entité évolue alors en fonction de son état propre et de celui de ses voisins. Le principe d'un algorithme distribué est que chaque entité exécute le même algorithme selon ses connaissances locales. L'enjeu des algorithmes distribués est de réussir à faire collaborer toutes ses entités pour accomplir une tâche globale tout en ayant une vision locale du réseau.

3.5 Auto-stabilisation :

Pour définir l'auto-stabilisation on a besoin de définir quelques notions telles que :

- **Panne :** une panne est la manifestation au niveau du service rendu d'une faute. Dans un système réparti elle désigne une défaillance temporaire ou définitive d'un ou plusieurs composants du système.
- **Panne transitoire :** une panne transitoire est une panne temporelle qui apparaît une seule fois. On peut la définir aussi comme une panne non-définitive qui altère le comportement du réseau comme la mort d'un capteur par exemple.
- **Etat d'un processus :** est défini comme étant l'état de l'ensemble de ses variables.
- **Configuration :** une configuration est l'ensemble des états de tous les capteurs. L'ensemble des configurations possibles est divisé en deux sous-ensembles :

- ♦ **Les configurations légitimes :** à partir desquelles le système exécute correctement la tâche pour laquelle il a été conçu.
- ♦ **Les configurations illégitimes :** ou le système ne vérifie pas la spécification de la tâche pour laquelle il a été conçu.

3.5.1 Définition d'auto-stabilisation :

Lorsque tous les composants du système fonctionnent correctement la plupart du temps, on peut accepter une interruption temporaire (c'est le cas lors des défaillances transitoires) de service, mais néanmoins garantir un retour à la normale au bout d'un temps fini. L'auto-stabilisation [19].consiste à toujours agir comme si tous les autres composants du système étaient corrects. Évidemment, en cas de panne, le système peut être dans une configuration illégitime, mais si l'algorithme est auto-stabilisant, alors après un temps fini généralement borné et en l'absence de nouvelles pannes, le système est de nouveau dans une configuration légitime. On peut dire aussi que l'auto-stabilisation est un paradigme général permettant de concevoir des algorithmes distribués tolérants aux pannes transitoires. Elle est comme la propriété pour un système qui recouvre de lui-même un comportement correct en un nombre fini d'étapes quel que soit son état initial. Les algorithmes auto-stabilisants sont donc très adaptés aux systèmes admettant des pannes transitoires ou ne pouvant pas être initialisés.

3.5.2 Définition formelle d'auto-stabilisation :

Soit C un ensemble de toutes les configurations. On dit qu'un système S est auto-stabilisant par rapport à A tel que $A \subseteq C$ si et seulement s'il satisfait aux deux conditions suivantes:

Convergence : chaque exécution de S contient au moins une configuration en A .

Fermeture : pour toute configuration $B \in A$, toute configuration N qui suit B est également dans A .

3.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé notre réseau de capteurs sans fil par un graphe UDG, expliquer les différents composants et notions dont on a besoin pour comprendre cette modélisation. Ainsi, nous avons donné la signification d'un algorithme distribué et les différentes notions pour comprendre l'auto-stabilisation de ce dernier.

Chapitre 4 : Implémentation

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'implémentation de notre application où nous allons présenter les différentes définitions qui permettent de comprendre la création de notre réseau de capteurs et les différents composants qui le construits. Ainsi, nous allons décrire notre solution en présentant un algorithme de réduction de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil en réduisant l'énergie liée à la récolte de donnée et à l'utilisation de la radio.

4.2 Implémentation du réseau :

Pour implémenter notre réseau, on a besoin d'implémenter ses différents composants. Nous allons montrer comment on a fait la création de ces derniers :

4.2.1 Création du graphe : la création du graphe s'est faite par la saisie de nombre de nœuds, de rayon de communication et de rayon de captage. Chaque nœud inclue dans son disque et il existe des relations telles que des liens ou des arêtes entre les nœuds qui sont voisins. On dit que deux nœuds $n1$ et $n2$ sont voisins, si les deux communiquent entre eux, c'est-à-dire si le nœud $n1$ communique avec le nœud $n2$ alors, le nœud $n2$ communique lui aussi avec le nœud $n1$, dans ce cas-là, on peut faire le lien entre eux et dire qu'ils sont voisins (ou adjacents). L'objectif est de créer un graphe UDG dont tous les nœuds ont le même rayon.

4.2.2 Création des nœuds : la création des nœuds s'est faite par la saisie du nombre de nœuds dans le champ de texte. Chaque nœud possède des coordonnées x et y dont les valeurs sont aléatoires, ce qui fait que la distribution des nœuds se fait d'une manière aléatoire dans la zone d'observation. Il possède aussi une liste de voisins, une unité de communication pour communiquer avec ses voisins et une unité de captage pour pouvoir capter une région dans la zone totale.

4.2.3 Création des disques de communication : la création des disques de communication s'est faite par la saisie du rayon de communication dans son champ de texte, chaque disque doit contenir un nœud dans son centre, c'est-à-dire chaque nœud est couvert par son rayon de communication. La taille du disque est double fois la taille du rayon.

4.2.4 Création des disques de captage : la création des disques de captage c'est la même que la création des disques de communication sauf que chaque nœud doit être couvert par son rayon de captage. Le rayon de captage doit être supérieur ou égal au rayon de communication.

4.2.5 Création des liens : c'est de faire une liaison entre les nœuds qui sont voisins par des arêtes. On prend en considération la condition de la distance par rapport au rayon de communication (c'est-à-dire, faire un lien si et seulement si la distance entre les deux nœuds est inférieure ou égale au rayon de communication).

4.2.6 Liste de voisinage : on appelle voisinage d'un nœud u, l'ensemble $N(u)$ contenant les nœuds que u peut joindre directement. La relation binaire représentant le lien de communication entre deux nœuds est supposée symétrique, c.-à-d. $u' \in N(u) \Leftrightarrow u \in N(u')$ (dans le cas où tous les nœuds du réseau ont la même portée de communication).

C'est une liste qui contient tous les voisins de chaque nœud. L'ensemble des voisins est stocké dans une liste chaînée. On dit que deux nœuds n_1 et n_2 sont voisins ou adjacents (reliés par une arête) si la distance euclidienne (d) entre eux est inférieure ou égale au rayon de communication

$(d(n_1, n_2) \leq R_c)$.

La distance euclidienne dans [21] entre les deux nœuds n_1 et n_2 est calculée par :

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

4.3 Vérification de la connexité du graphe :

Puisque la création des nœuds qui composent le graphe s'est faite aléatoirement, on a besoin de savoir s'ils sont tous reliés entre eux, parce que notre but est de créer un graphe UDG et connexe. Donc, après la construction du graphe, il faut tester sa connexité, on prend en considération que si le graphe n'est pas connexe, on le reconstruit jusqu'à obtenir un graphe connexe. Pour ce faire, on a besoin de parcourir le graphe et on a choisi le parcours en largeur qui est définit la ce qui suit.

4.3.1 Définition de parcours en largeur :

Le parcours de graphe est un algorithme consistant à explorer les sommets d'un graphe de proche en proche à partir d'un sommet initial. L'algorithme de parcours en largeur permet le parcours d'un graphe ou d'un arbre de la manière suivante : on commence par explorer un nœud source, puis ses successeurs, puis les successeurs non explorés des successeurs, etc. Il permet de calculer les distances de tous les nœuds depuis un nœud source dans un graphe non orienté. Il peut aussi servir à déterminer si un graphe non orienté est connexe.

4.3.2 Algorithme de parcours (en largeur) du graphe :

Soit G un graphe UDG de n nœuds, donné sous la forme de ses listes d'adjacences. On explore à partir du sommet s pour tester la connexité du graphe.

Algorithme :

pour i de 1 à n faire

marqué[x] = faux

$F \leftarrow \text{filevide}()$

ajoute (s, F)

marqué[s] = vrai

$i \leftarrow 1$

tantque non vide (F) faire

$p_i \leftarrow \text{retire} (F)$

$i \leftarrow i + 1$

 pour tout successeur succ de p_i faire

 si marqué[succ] = faux alors

 ajoute(succ, F)

 marqué[succ] = vrai

 finsi

 finpour

fintantque

résultat : Si tous les nœuds ont été marqués alors le graphe est connexe.

4.4 Couverture :

Soit un réseau de « n » nœuds déployés pour surveiller une zone d'observation. Chaque nœud est caractérisé par son rayon de communication « R_c » et son rayon de captage « R_{cap} », et va couvrir une région dans la zone. La couverture dans un réseau de capteurs sans fil dépend fortement de la densité des nœuds. L'objectif est de savoir si la zone d'observation est couverte ou pas par l'ensemble des nœuds et quel est le pourcentage qui est couvert par tous les nœuds par rapport à la zone totale. On distingue deux types de couverture telles que :

4.4.1 Couverture en terme de communication : on dit qu'un capteur « c » couvre un point « p » si et seulement si la distance entre « c » et « p » est inférieure ou égale au rayon de communication ($d(c, p) \leq R_c$). Le but est de savoir quel est le pourcentage de couverture de communication par rapport à la zone totale.

4.4.2 Couverture en terme de captage : c'est un ensemble de cercles qui forme un graphe UDG. Un nœud couvre une région sous forme de disque de centre « c ». On dit qu'un point « p » est couvert par « c » s'il se trouve dans ce disque de capture. Le but est de savoir le pourcentage de couverture de captage par rapport à la zone totale.

4.5 Description des modes d'un capteur :

Un capteur peut se mettre sous l'un des modes suivants : sonde, actif, inactif ou mort, et cela selon ses deux unités de communication et de captage tels que :

4.5.1 Mode sonde : un capteur dans ce mode peut communiquer avec ses voisins comme il peut aussi capter une zone dédiée dans la zone totale (c'est-à-dire unité de communication_on, unité de captge_on).

4.5.2 Mode actif : un capteur dans ce mode peut que communiquer avec ses voisins (c'est-à-dire unité de communication_on, unité de captge_off).

4.5.3 Mode inactif : un capteur dans ce mode ne peut ni communiquer avec ses voisins ni capter dans la zone d'observation (c'est-à-dire unité de communication_off, unité de captage_off).

4.5.4 Mode mort : permet de mettre la fin de vie d'un capteur. Un capteur se retrouve dans ce mode lorsque sa réserve d'énergie est épuisée.

Un capteur dans le mode inactif c'est comme s'il est en dorme, ses deux unités (de communication et de captage) sont éteintes, mais lorsque la temporisation de veille expire, il change ce mode vers le mode sonde lorsque ses unités s'allument où il peut capter et communiquer avec ses voisins.

Un capteur dans le mode sonde peut changer le mode et être dans le mode inactif si ses deux unités s'éteignent, comme il peut se trouver dans le mode actif si son unité de captage s'éteint.

Un capteur dans le mode actif peut changer le mode vers le mode inactif lorsque son unité de communication s'éteint, comme il peut se trouver dans le mode mort s'il est hors énergie (c'est-à-dire sa réserve d'énergie est épuisée).

4.6 Algorithme distribué et auto-stabilisant de réduction d'énergie dans un réseau de capteurs sans fil :

Nous allons d'abord expliquer l'algorithme de construction d'arbre de recouvrement qui est une base pour notre solution.

4.6.1 Algorithme auto-stabilisant de construction d'arbre :

Pour construire l'arbre de recouvrement, nous avons appliqué un algorithme auto-stabilisant qui est défini dans [22] comme suit :

Choisir arbitrairement un nœud racine $R \in V$.

Compter la distance pour l'arbre et décidez d'un père.

Fixer la distance de la racine (DR) à 0 et le père de la racine (PR) à R.

$DR := 0$;

$PR := R$;

Calculer la distance D_i et le père P_i pour chaque nœud n .

$D_i := \min \{D_j + 1 \mid n_j \in N_i\}$;

$P_i := \min \{n_j \in N_i \mid D_j < D_i\}$;

Les variables locales :

V : l'ensemble de nœuds qui constituent le graphe

R : la racine

DR : la distance de la racine

PR : le père de la racine

P_i : l'identifiant du père du i ème nœud dans l'arbre.

D_i : la distance par rapport au nœud racine R.

D_j : la distance par rapport au père du j ième nœud

n_j : le j ème voisin du nœud i

N_i : les nœuds voisins du nœud i

4.6.2 Explication de l'algorithme de construction d'arbre de recouvrement:

Le but de l'algorithme est de construire un arbre de recouvrement à partir d'un graphe. L'arbre de recouvrement constitue de la racine et l'ensemble de nœuds qui ont chacun son père et sa distance par rapport à la racine (le père de la racine est lui-même, donc la distance de la racine par rapport à son père égal à 0).

Pour construire l'arbre de recouvrement, il faut choisir arbitrairement un nœud parmi l'ensemble de nœuds qui constituent le graphe, compter sa distance par rapport à l'ensemble de ses voisins dans l'arbre et décidez qui est son père. On dit qu'un nœud (n_1) est le père d'un nœud (n_2) si la distance entre (n_2) est (n_1) est la minimum par rapport aux autres nœuds voisins, et la valeur de nœud (n_2) est égale à la valeur de son père (n_1) +1.

Le but de l'auto-stabilisation pour la construction d'arbre est que à chaque fois que le graphe n'est pas stabilisé, on doit mettre une mise-à-jour de ce dernier, c'est-à-dire on doit donner à chaque nœud son père et sa distance par rapport à la racine jusqu'à que le graphe se stabilisera au bout d'un temps fini (c'est-à-dire chaque nœud prend sa bonne valeur).

4.6.3 Explication de notre l'algorithme :

Après la construction de l'arbre de recouvrement, nous avons appliqué notre algorithme pour pouvoir éteindre les unités de communication et de captage des nœuds et cela pour préserver l'énergie.

L'algorithme proposé est un algorithme distribué et auto-stabilisant qui permet d'avoir une tolérance aux pannes transitoires, et qui permet d'éteindre les unités des nœuds pour réduire la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil en réduisant l'énergie liée à la récolte de données (captage) et celle liée à la radio (communication). Puisque l'algorithme est distribué donc chaque nœud va exécuter les instructions en interne, c'est-à-dire, il va exécuter le même algorithme selon ses connaissances locales pour accomplir une tâche globale.

Dans le graphe, chaque nœud est couvert par son rayon de communication ou son rayon de captage. L'algorithme proposé ne s'applique que si le rayon de captage est supérieur ou égal au rayon de communication ($R_{cap} \geq R_{com}$) pour que le graphe puisse se créer.

Il y a trois cas dont lesquels on peut éteindre les unités des nœuds tels que :

- Si la distance par rapport à la racine $\% (R_{cap}/R_{com}) = 0$: les deux unités de communication et de captage sont allumées.
- Si la distance par rapport à la racine $\% (R_{cap}/R_{com}) \neq 0$: éteindre l'unité de captage
- Si le nœud est une feuille : éteindre les deux unités de communication et de captage.

Donc, après l'application de l'algorithme, trois types de nœuds peuvent être créés tels que :

- Les nœuds en mode sonde : sont les nœuds qui ont les deux unités de communication et de captage allumées (OnOn).
- Les nœuds en mode actif : sont les nœuds qui ont l'unité de communication allumée et l'unité de captage éteinte(OnOff).
- Les nœuds en mode inactif : sont les nœuds qui ont les deux unités éteintes (Off).

Nous allons montrer tout ça dans le chapitre qui décrit l'application plus tard.

4.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents algorithmes qu'on a besoin pour implémenter notre système tels que : l'algorithme de parcours en largeur pour vérifier la connexité du graphe et l'algorithme distribué et l'auto-stabilisant pour la réduction d'énergie dans le réseau de capteurs sans fil. Ainsi, nous avons identifié la couverture en terme de communication et en terme de captage dans les réseaux de capteurs sans fil.

Chapitre 5 : Description de l'application

5.1 Introduction :

Après avoir présenté dans les chapitres précédents la présentation de réseau de capteurs sans fil généralement, nous donnons dans ce chapitre quelques détails sur la réalisation de l'application et les outils utilisés.

Nous expliquons le principe de fonctionnement de l'application via des différents extraits d'interfaces implémentées ainsi que les résultats obtenus.

5.2 Les outils de programmations :

5.2.1 Choix du langage de programmation :

Pour le choix du langage de programmation de notre application, nous avons opté pour le langage **JAVA**, et pour les raisons suivantes :

JAVA est un langage orienté objet simple, qui réduit le risque des erreurs d'incohérences. Il est indépendant de toute plateforme. Les programmes JAVA peuvent être exécutés sur tous les environnements qui possèdent une Java Virtual Machine (JVM). Il est doté d'une riche bibliothèque de classes, comprenant la gestion des interfaces graphiques (fenêtres, menus, graphismes, boîtes de dialogue, contrôles), la programmation multithread (multitâche), la gestion des exceptions. Il permet d'accéder d'une manière simple aux fichiers et aux réseaux (notamment Internet). Il représente le langage le plus utilisé par les développeurs. Ce langage s'est donc imposé comme étant une conséquence de nos précédents choix en termes de plateforme de développement.

5.2.2 Choix de la plateforme de développement :

Concernant l'environnement de développement utilisé pour le développement de notre application, nous avons opté pour **Netbeans** qui est mis en open source, par Sun sous licence CDDL (Common Développement and Distribution Licence). Il est disponible sur les plateformes (Windows, Linux, Mac et Solaris). En plus de java, Netbeans supporte d'autres langages comme (C, C++, XML, HTML). Il est bien documenté et offre aux développeurs le moyen de créer rapidement des applications Web, d'entreprise, de bureau, des applications mobiles en utilisant la plateforme de Java.

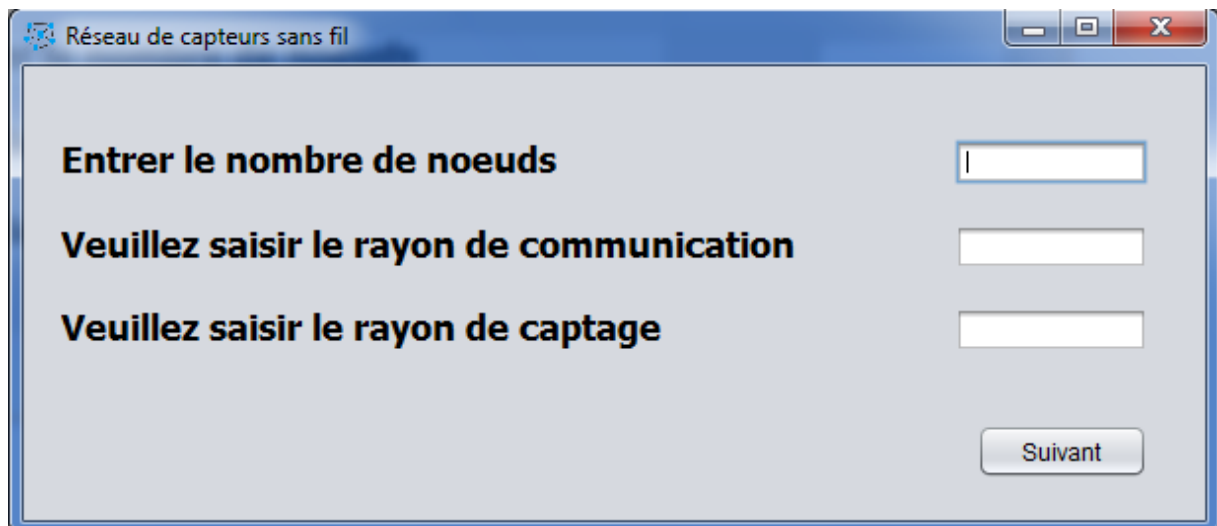
5.3 Description de l'application :

Dans ce qui suit, nous allons présenter le fonctionnement de notre application en montrant ses différentes interfaces qui sont conçues de manière très simples, naturelles pour aboutir à une compréhension et utilisation faciles.

5.4 Les interfaces graphiques de l'application :

5.4.1 L'interface de saisie :

Lors de l'exécution de notre application une première fenêtre s'affiche dans laquelle on fait la saisie comme montre la figure 5.1, pour cela il faudra saisir « le nombre de nœuds », « le rayon de communication » et « le rayon de captage » respectivement. Ensuite, il faudra faire une clique sur le bouton « Suivant » pour pouvoir accéder à la fenêtre principale.



The screenshot shows a Java Swing window titled "Réseau de capteurs sans fil". It has a standard Windows-style title bar with minimize, maximize, and close buttons. The main content area is light gray and contains three text prompts in bold black font, each followed by a white rectangular input field. The prompts are: "Entrer le nombre de noeuds", "Veuillez saisir le rayon de communication", and "Veuillez saisir le rayon de captage". At the bottom right of the window, there is a button labeled "Suivant".

Figure 5.1 : La fenêtre de la saisie de l'application

Remarque :

Nous ne pouvons pas accéder à la fenêtre principale dans les cas suivants :

-Si un/les champs de texte sont vides ou contiennent des espaces.

-Si le nombre de nœuds ou le rayon de communication ou de captage sont des chaînes de caractère ou ne sont pas des nombre entiers positifs.

Dans ce cas-là, un message d'erreur va s'afficher comme montre la figure 5.2 :

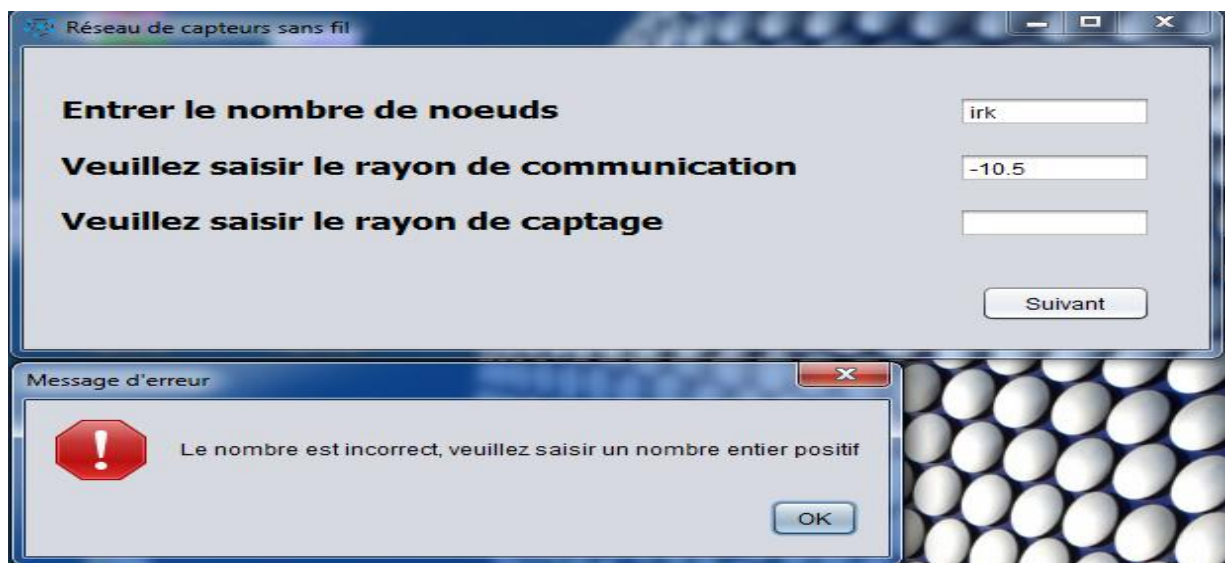


Figure 5.2 : La fenêtre d'affichage de message d'erreur

5.4.2 L'interface Principale :

La saisie génère une deuxième interface qui est l'interface principale. Elle offre à l'utilisateur les fonctionnalités qui lui facilitent l'utilisation de l'application. Ainsi que la représentation des différents boutons à partir lesquels nous pouvons construire notre réseau de capteurs qui va se dessiner sur la zone d'observation (panneau qui est en blanc). L'interface illustrée dans la figure 5.3 représente l'interface principale de notre application.

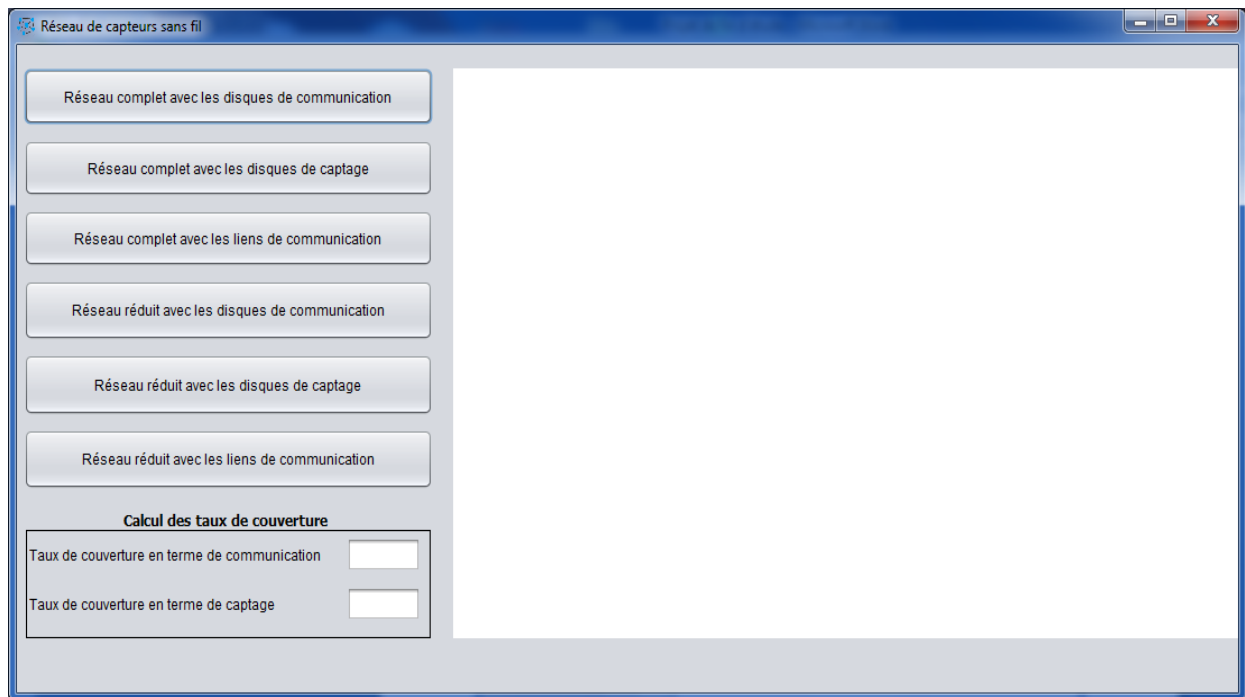


Figure 5.3 : La fenêtre principale de l'application

5.4.3 Fonctionnalités des différents boutons :

5.4.3.1 Bouton 1 : représente le réseau complet avec les disques de communication.

Lorsque nous cliquons sur ce bouton, le graphe (tel que les nœuds avec les disques de communication) va s'afficher sur la zone d'observation s'il est connexe, sinon il va se reconstruire automatiquement jusqu'il soit connexe. Les nœuds sont dispersés aléatoirement avec leurs disques de communication.

La figure 5.4 représente le réseau complet avec les disques de communication et le taux de couverture en terme de communication et en terme de captage.

5.4.3.2 Calcul des taux :

Après la construction du graphe, le taux de couverture en terme de communication et en terme de captage vont se mettre à jour lors d'un clique sur chacun des boutons dans la figure 5.4 et vont s'afficher respectivement dans les champs de texte comme montre clairement la figure 5.5 :

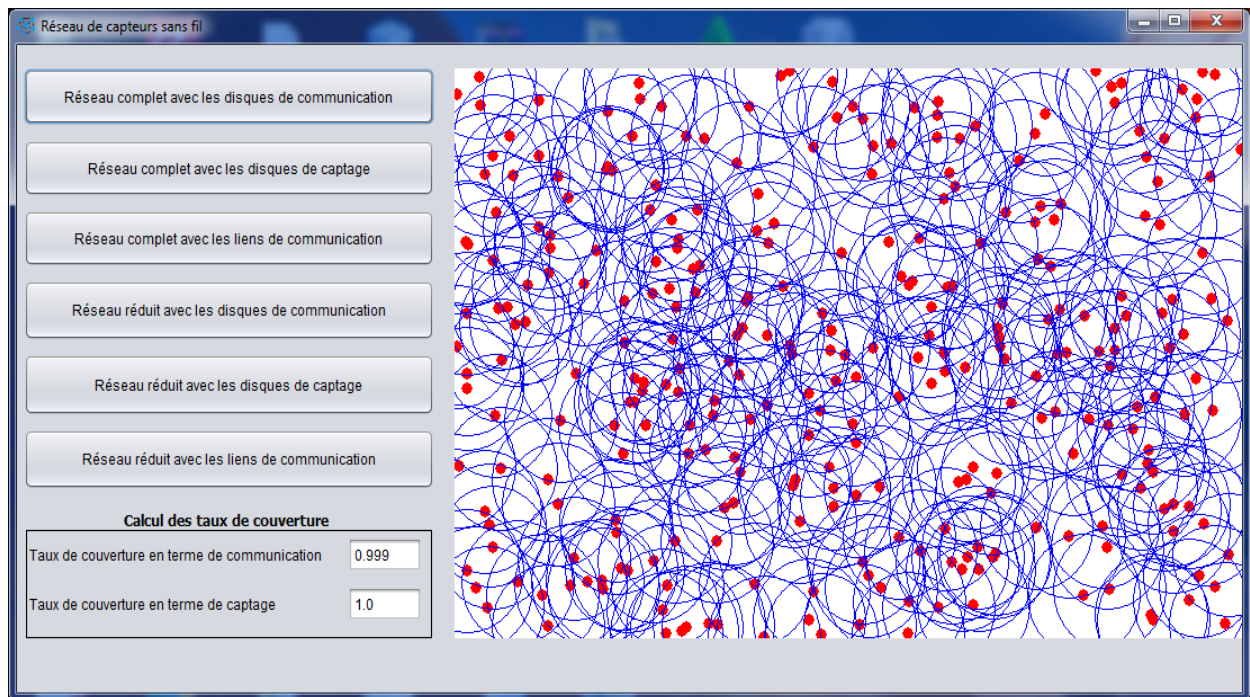


Figure 5.4 : Réseau complet avec les disques de communication

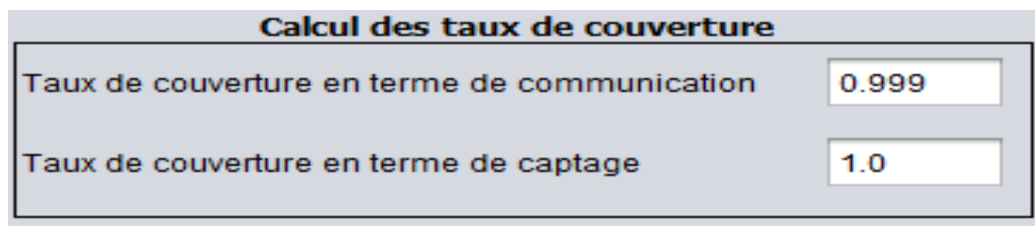


Figure 5.5 : Calcul des taux des couvertures

Pour avoir les résultats qui sont dans la figure 5.5, nous avons fait le calcul suivant :

Taux de communication = nombre de pixels couvrants par le rayon de communication / la surface de la zone totale.

Taux de captage = nombre de pixels couvrants par le rayon de captage / la surface de la zone totale.

Pixel couvrant : un pixel est dite couvert, si la distance entre lui et un nœud quelconque est inférieure ou égale au rayon de communication ou de captage.

Zone totale : c'est la zone d'observation qui contient l'ensemble de nœuds et les pixels.

Si on saisit le rayon de communication même que le rayon de captage, alors leurs taux soient les même, sinon on peut les différencier lors de la saisie des rayons dans les champs de texte.

5.4.3.3 Bouton 2 : représente le réseau complet avec les disques de captage.

Chaque disque de captage se représente par un cercle qui va couvrir une des régions de la zone totale pour avoir un graphe UDG. Par ce graphe, on peut savoir le pourcentage de couverture de captage par rapport à la zone totale (voir figure 5.6).

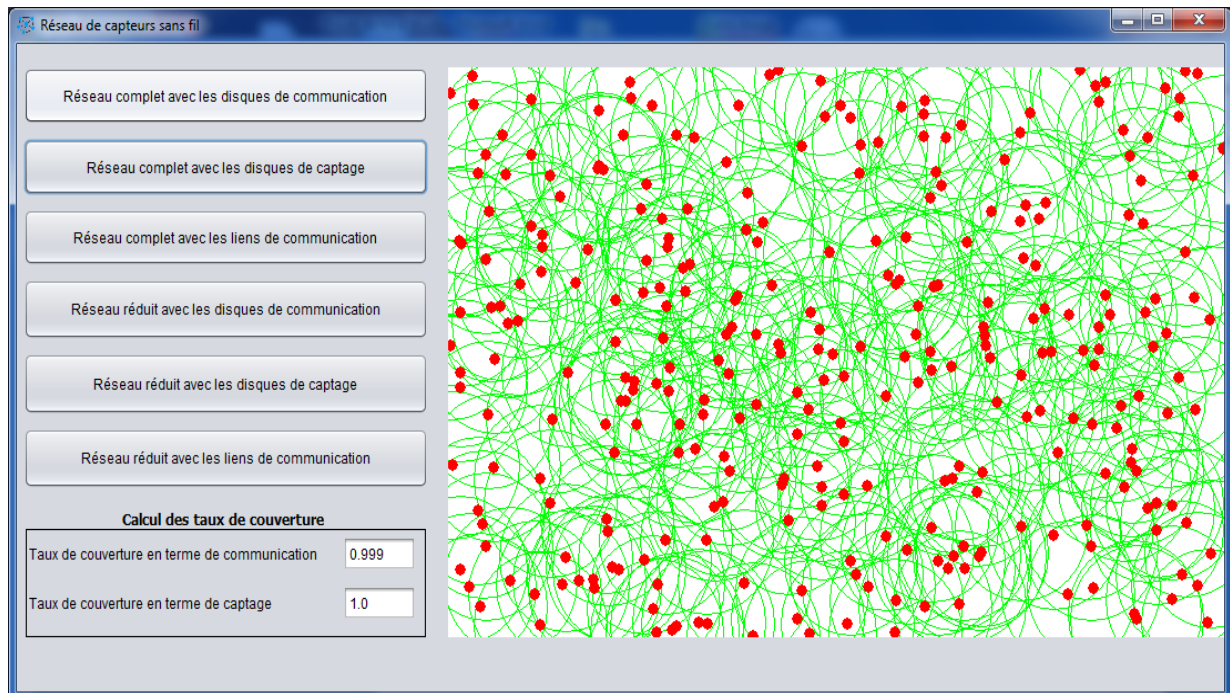


Figure 5.6 : Réseau complet avec les disques de captage

5.4.3.4 Bouton 3 : représente le réseau complet avec les liens de communication.

La figure 5.7 représente l'ensemble de nœuds avec les liens de communication.

Un lien se fait entre deux nœuds si la distance euclidienne entre ces deux est inférieure ou égale au rayon de communication comme nous avons expliqué dans les chapitres précédents.

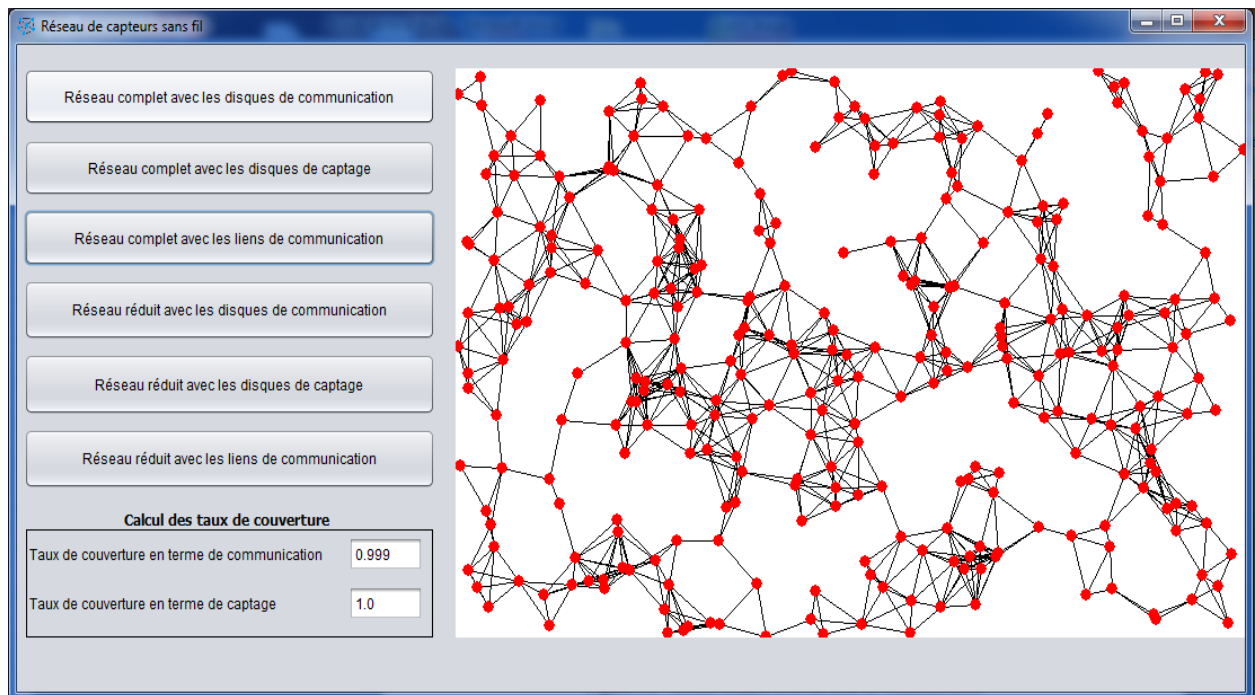


Figure 5.7 : Réseau complet avec les liens de communication

5.4.3.5 Bouton 4 : représente le réseau réduit avec les disques de communication.

La figure 5.8 représente l'ensemble des nœuds avec les liens de communication après l'application de l'algorithme. Tel qu'il existe trois couleurs différentes ce qui implique qu'il y a trois types de nœuds comme nous avons expliqué plus tôt tels que : les nœuds en mode sonde (OnOn) qui sont en rouge, les nœuds en mode actif (OnOff) qui sont en jaune et les nœuds en mode inactif (Off) qui sont en noir.

Dans ce graphe, nous n'avons dessiné que les disques des nœuds qui ont l'unité de communication allumée (les nœuds en jaune et les nœuds en rouge).

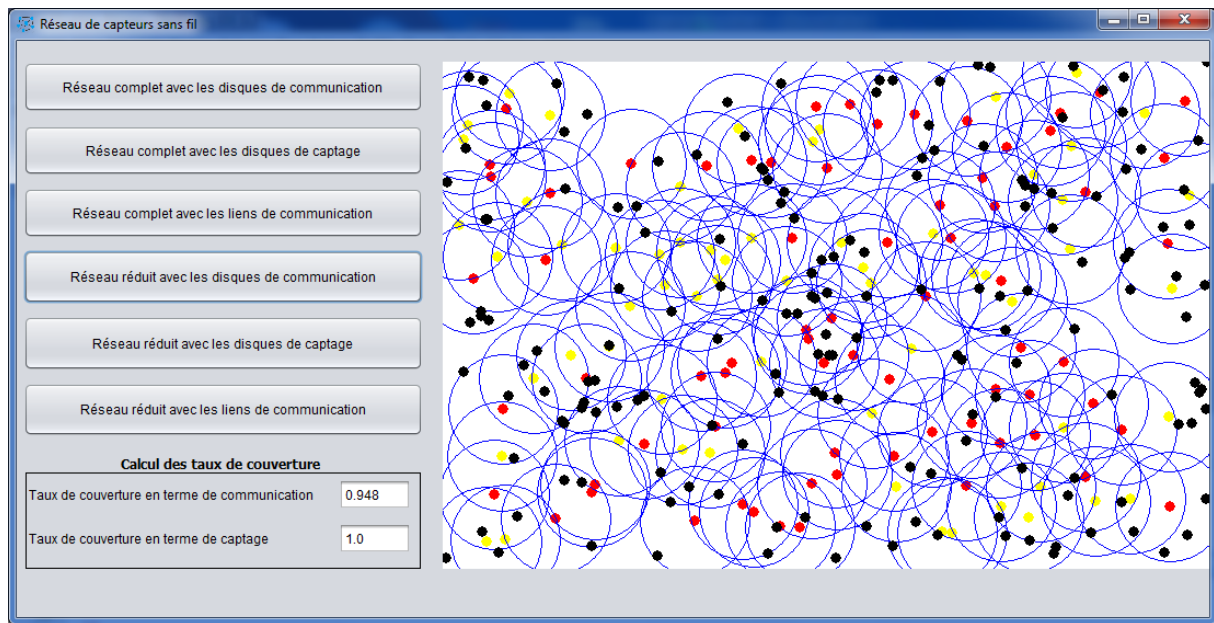


Figure 5.8: Réseau réduit avec les disques de communication

5.4.3.6 Bouton 5 : représente le réseau réduit avec les disques de captage.

Lors d'un clique sur ce bouton, que les disques des nœuds qui ont l'unité de captage allumée vont être dessinés (les nœuds en rouge). La figure 5.9 montre notre explication.

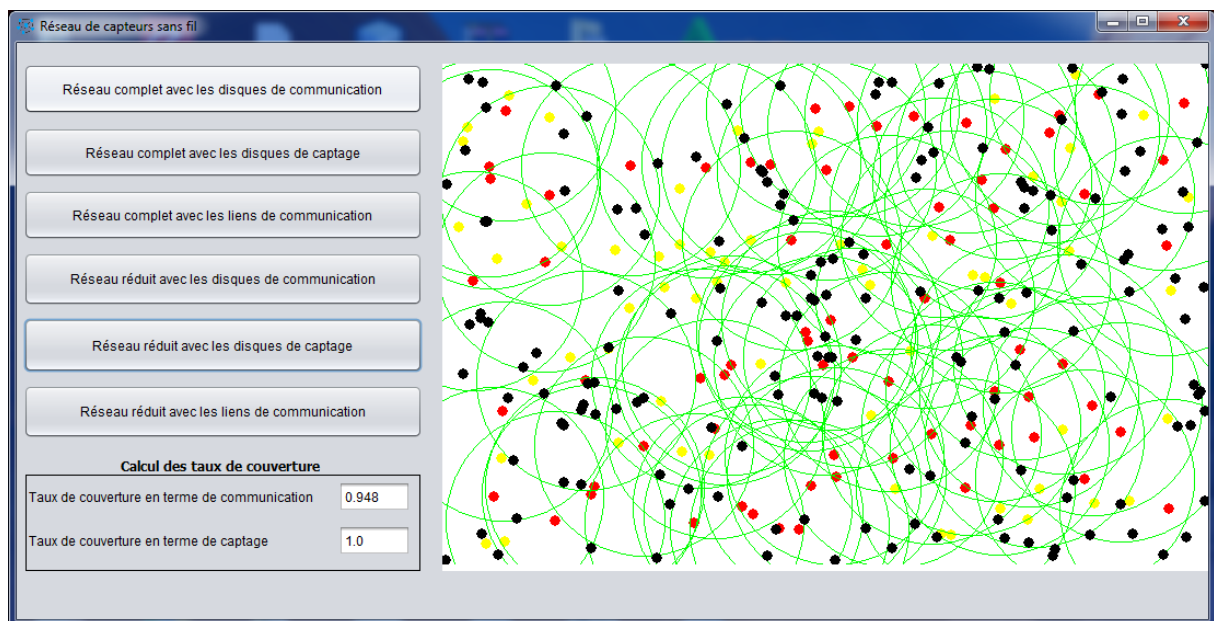


Figure 5.9: Réseau réduit avec les disques de captage

5.4.3.7 Bouton 6 : représente le réseau réduit avec les liens de communication.

La figure 5.10 représente l'ensemble de nœuds avec les liens entre les nœuds qui ont l'unité de communication allumée ou qui ont les deux unités allumées (les nœuds en jaune et les nœuds en rouge).

Les nœuds qui sont en noir ne peuvent ni communiquer ni capter parce qu'ils sont éteints.

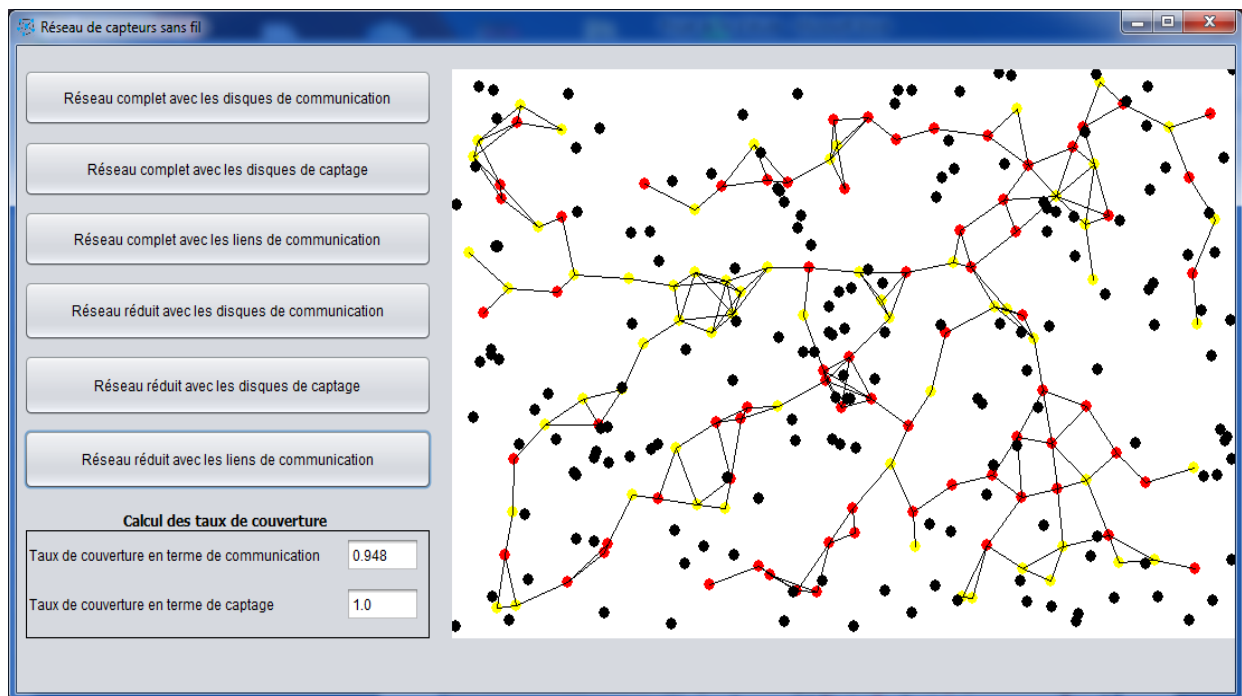


Figure 5.10: Réseau réduit avec les liens de communication

5.5 Tableaux des résultats :

Les tableaux ci-dessous (5.11, 5.12, 5.13, 5.14) représentent les différents résultats tels que :

Après la saisie du nombre de nœuds, le rayon de communication et le rayon de captage dans les champs de texte, nous avons obtenu les résultats suivants tels que :

- Le nombre de nœuds en mode sonde.
- Le nombre de nœuds en mode actif.
- Le nombre de nœuds en mode inactif.
- Le taux de couverture en terme de communication avant l'application de l'algorithme.
- Le taux de couverture en terme de captage avant l'application de l'algorithme.

- Le taux de couverture en terme de communication après l'application de l'algorithme.
- Le taux de couverture en terme de captage après l'application de l'algorithme.

La figure 5.11 montre les différents résultats obtenus avec le nombre de nœuds '200', le rayon de communication '55', et les rayons de captage '55, 60, 80, 100, 110, 150, 200'.

Nombre de nœuds	200	200	200	200	200	200	200
Rayon de communication	55	55	55	55	55	55	55
Rayon de captage	55	60	80	100	110	150	200
Nombre de nœuds en mode sonde (OnOn)	101	93	94	99	37	57	23
Nombre de nœuds en mode actif (OnOff)	0	0	0	0	51	42	71
Nombre de nœuds en mode inactif (Off)	99	107	106	101	112	101	106
Taux de couverture de communication avant l'application de l'algorithme	0.991	0.981	0.986	0.985	0.994	0.974	0.995
Taux de couverture de captage avant l'application de l'algorithme	0.991	0.987	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Taux de couverture de communication après l'application de l'algorithme	0.938	0.887	0.92	0.901	0.914	0.877	0.913
Taux de couverture de captage après l'application de l'algorithme	0.938	0.916	0.993	1.0	0.987	1.0	1.0

Figure 5.11: Tableau des résultats pour 200 nœuds

La figure 5.12 montre les différents résultats obtenus avec le nombre de nœuds ‘300’, le rayon de communication ‘45’, et les rayons de captage ‘45, 60, 80, 100, 110, 150, 200’.

Nombre de nœuds	300	300	300	300	300	300	300
Rayon de communication	45	45	45	45	45	45	45
Rayon de captage	45	60	80	100	110	150	200
Nombre de nœuds en mode sonde(OnOn)	145	148	138	79	76	55	37
Nombre de nœuds en mode actif(OnOff)	0	0	0	67	65	96	106
Nombre de nœuds en mode inactif (Off)	155	152	162	154	159	149	157
Taux de couverture de communication avant l’application de l’algorithme	0.998	0.996	0.988	0.992	0.991	0.997	0.994
Taux de couverture de captage avant l’application de l’algorithme	0.998	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Taux de couverture de communication après l’application de l’algorithme	0.937	0.949	0.912	0.937	0.903	0.934	0.992
Taux de couverture de captage après l’application de l’algorithme	0.937	0.994	0.997	1.0	1.0	1.0	0.989

Figure 5.12: Tableau des résultats pour 300 nœuds

La figure 5.13 montre les différents résultats obtenus avec le nombre de nœuds ‘400’, le rayon de communication ‘40’, et les rayons de captage ‘40, 60, 80, 100, 110, 150, 200’.

Nombre de nœuds	400	400	400	400	400	400	400
Rayon de communication	40	40	40	40	40	40	40
Rayon de captage	40	60	80	100	110	150	200
Nombre de nœuds en mode sonde (OnOn)	183	194	81	93	101	76	36
Nombre de nœuds en mode actif (OnOff)	0	0	105	86	89	110	164
Nombre de nœuds en mode inactif (Off)	217	206	214	221	210	214	200
Taux de couverture de communication avant l'application de l'algorithme	0.992	0.997	0.997	0.992	0.996	0.994	0.992
Taux de couverture de captage avant l'application de l'algorithme	0.992	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Taux de couverture de communication après l'application de l'algorithme	0.912	0.945	0.926	0.932	0.935	0.94	0.95
Taux de couverture de captage après l'application de l'algorithme	0.912	0.997	0.979	0.999	1.0	1.0	1.0

Figure 5.13: Tableau des résultats pour 400 nœuds

La figure 5.14 montre les différents résultats obtenus avec le nombre de nœuds ‘500’, le rayon de communication ‘40’, et les rayons de captage ‘40, 60, 80, 100, 110, 150, 200’.

Nombre de nœuds	500	500	500	500	500	500	500
Rayon de communication	40	40	40	40	40	40	40
Rayon de captage	40	60	80	100	110	150	200
Nombre de nœuds en mode sonde (OnOn)	219	227	119	105	112	76	39
Nombre de nœuds en mode actif (OnOff)	0	0	100	106	115	154	177
Nombre de nœuds en mode inactif (Off)	281	273	281	289	273	270	284
Taux de couverture de communication avant l’application de l’algorithme	0.994	0.999	0.997	0.999	0.997	1.0	0.998
Taux de couverture de captage avant l’application de l’algorithme	0.994	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Taux de couverture de communication après l’application de l’algorithme	0.941	0.968	0.936	0.93	0.977	0.971	0.958
Taux de couverture de captage après l’application de l’algorithme	0.941	1.0	0.992	1.0	1.0	0.999	1.0

Figure 5.14: Tableau des résultats pour 500 nœuds

5.6 Interprétation des résultats :

Nous remarquons qu'à chaque fois qu'on saisit le rayon de captage plus grand, le nombre de nœuds en mode sonde « OnOn » devient plus petit et le nombre de nœuds en mode actif « OnOff » devient plus grand et cela suggère de réduire la consommation d'énergie.

Le nombre de nœuds en mode inactif est vacillant lorsqu'on augmente le rayon de captage dans chaque tableau, mais plus le nombre de nœuds plus grand, plus le nombre de nœuds en mode inactif « Off » s'augmente en passant d'un tableau à un autre.

Le fait de mettre « Off », les unités de captage et de communication n'affecte pas significativement les taux de couvertures et surtout de captage (c'est-à-dire on préserve l'énergie sans affecter sur la couverture).

5.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné une description détaillée de notre application à travers des écrans capturées représentant les interfaces de l'application qu'ils sont conçues de manière à être simples et faciles à l'utilisation ainsi que des résultats.

Conclusion générale :

Les progrès technologiques réalisés ces dernières années ont permis le développement de nouveaux types de capteurs peu onéreux dotés de moyens de communication sans fil et de l'unité de détection, et pouvant s'auto-configurer pour former des réseaux de capteurs sans fil autonomes.

Dans ce projet, nous nous sommes tout d'abord focalisés sur des réseaux de capteurs sans fil, leurs topologies, leurs applications et les différents facteurs influençant leurs conceptions. Comme nous avons distingué les différents états d'un capteur ainsi que ses composants.

L'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil a attiré beaucoup d'attention ces dernières années et a présenté des défis uniques par rapport aux réseaux câblés traditionnels.

Les réseaux de capteurs sans fil ont beaucoup de limites comme la limitation des capacités de traitement, de stockage et surtout d'énergie. C'est pourquoi, des recherches approfondies ont été menées pour remédier à ces limites en élaborant des solutions qui peuvent améliorer l'efficacité des ressources. De nombreux travaux portent aujourd'hui sur la gestion de l'énergie consommée par les capteurs dans un réseau. La diversité des solutions est liée à la diversité des applications et des spécifications de ces réseaux.

Nous avons évoqué dans ce rapport tout ce qui concerne l'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil en commençant par les facteurs et les composants responsables de la dissipation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons ensuite présenté différentes classes de solutions pour les économies d'énergie telles que le routage efficace en énergie, l'utilisation de la mobilité, les solutions de contrôle de topologie, les techniques du Sommeil/Réveil, les techniques orientées données et la technique de la réduction de captage et de conversion numérique. Tout cela pour prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs.

Nous avons modélisé aussi notre système qui est le réseau de capteurs sans fil par un graphe UDG parce que nous avons considéré que tous les nœuds ont la même portée de transmission.

Ainsi nous avons expliqué les différents composants tels que, un nœud, un lien, une chaîne, un cycle...etc. Aussi les différentes notions qui concernent la modélisation de notre réseau comme la notion d'un graphe, d'un graphe de disques, d'un graphe UDG, d'un graphe non orienté, connexe, sans cycle, d'un Arbre de recouvrement. Nous avons aussi expliqué le lien entre un graphe non orienté et arbre, la distance entre deux sommets d'un graphe, un algorithme distribué et aussi l'auto-stabilisation avec des différentes notions qui l'exprime.

Ensuite, nous avons implémenté notre système en décrivant la création du graphe, des nœuds, des disques, des liens, et aussi la définition d'un voisinage et de la liste de voisins. Nous nous sommes focalisés sur les différents algorithmes tels que, l'algorithme de parcours pour tester la connexité du graphe et l'algorithme distribué et l'auto-stabilisant pour la réduction de la consommation d'énergie dans les réseau de capteurs sans fil en réduisant l'énergie liée à la récolte de données et qui est notre solution dans ce projet. Ainsi, nous avons identifié le pourcentage de couverture en terme de communication et en terme de captage par rapport à la zone totale.

En fin, nous avons passé à la description de l'application, tel que nous avons présenté les outils de programmation (le langage de programmation et la plateforme de développement) et expliquer l'intérêt de notre choix. Ainsi, nous avons décrit notre application en présentant son fonctionnement à travers les différentes interfaces qui sont prises de l'application elle-même et qu'ils sont conçues et expliquées d'une manière compréhensible, simples et facile à utiliser.

Bibliographie

- [1] Collins Louis, « Optimisation centralisée et distribuée de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil », Thèse de doctorat soutenue en 2014 à l'Université Gaston Berger de Saint-Louis.
- [2] AqeelurRehman, Abu Zafar Abbasi, Noman Islam etZubair Ahmed Shaikh. « A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture».Computer Standards & Interfaces, 2011.
- [3] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh SankarasubramaniametErdalCayirci. « Wireless sensor networks: a survey ». Computer networks, 2002.
- [4] E. Sardiniet M. Serpelloni. « Instrumented wearable belt for wirelesshealth monitoring». Procedia Engineering, 2010.
- [5] HandeAlemdaretCemErsoy. « Wireless sensor networks for healthcare: A survey ». Computer Networks, 2010.
- [6] Luís Oliveira et Joel Rodrigues. « Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring». Journal of Communications, 2011.
- [7] M Karpiriski, Aline SenartetVinny Cahill. « Sensor networks for smart roads». In Pervasive Computing and CommunicationsWorkshops, 2006.Per Com Workshops 2006.Fourth Annual IEEE International Conference on, IEEE, 2006.
- [8] JatupornChinrungrueng, UdompornSunantachaikuletSatienTriamlumlerd. « Smart parking: An application of optical wireless sensor network». In Applications and the Internet Workshops, 2007. SAINT Workshops 2007. International Symposium on, IEEE, 2007.
- [9] Mohammad Reza Akhondi, Alex Talevski, Simon CarlsenetStig Petersen. « Applications of wireless sensor networks in the oil, gas and resources industries ».In Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2010 24th IEEE International Conference on.IEEE, 2010.

- [10] Delphine Christin, Parag S Mogreet Matthias Hollick. «Survey on wireless sensor network technologies for industrial automation: the security and quality of service perspectives». Future Internet, 2010.
- [11] I.F. Akyildiz, W. Su*, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, « Wireless sensor networks: a survey », In Broadband and Wireless Networking Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA, 2001
- [12] V. Handziski, A. Kopke, H. Karl, and A. Wolisz, « A common wireless sensor network architecture ». Technische Universität Berlin, 2003.
- [13] Rahim KACIMI, « Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil », in Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009
- [14] R. C. Shah, J. M. Rabaey, « Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks», in: IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'02), IEEE CS Press, 2002.
- [15] S. Gandham, M. Dawande, R. Prakash, S. Venkatesan.«Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations».In IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), 2003
- [16] Jalel Ben-Othman, Karim Bessaoud, Alain Bui, and Laurence Pilard.«Self-Stabilizing Algorithm for Efficient Topology control in Wireless Sensor Networks ».Journal of Computational Science, 2012.
- [17] Elena Fasolo, Michele Rossi, JörgWidmer, and Michele Zorzi. « In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey ». IEEE Wireless Communications, April 2007.
- [18] Mehmet C. Vuran, Özgür B. Akan, and Ian F. Akyildiz. « Spatio-temporal correlation : theory and applications for wireless sensor networks ». Computer Networks, 2004.
- [19] Dijkstra, E.W. « Self-stabilizing systems in spite of distributed control ». Communications of the ACM 17(11), 1974
- [20] S. Dolev, « Self-Stabilization », MIT Press, 2000.
- [21] M. Cardei and J. Wu, « Coverage in Wireless Sensor Networks », Department of Computer Science and Engineering. Florida Atlantic University, 2005.
- [22] Sayaka Kamei, and HirotsuguKakugawa, « A Self-stabilizing Approximation for the MinimumConnected Dominating Set with Safe Convergence », 1 Dept. of Information Engineering, Graduate School of Engineering, Hiroshima University, and 2 Dept. of Computer Science, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, 2008