

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A/Mira de Bejaïa
Faculté des Sciences Exactes
Département Informatique



Mémoire de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme Master en Informatique

Option : Administration et Sécurité des Réseaux

Thème

**Simulation du Routage dans les
Réseaux de Capteurs Sans Fils**

Réalisé par :

M^{me} HELAILI Nabila.

M^{me} MEKHNACHE Salima .

Devant le jury composé de :

Présidente : M^{elle} HAMZA Lamia.

Examinatrice1 : M^{me} KHALED Hayette.

Examinatrice2 : M^{Mr} SIDER Abed Rahman.

Promotrice : M^{me} GASMI Badrina.

Co- M^{elle} TIAB Amal.

Promotrice :

PROMOTION 2016-2017

Dédicaces

Je remercie Dieu de m'avoir donné le courage pour accomplir ce modeste travail que je

dédie :

À mes très chers parents qui sont la bougie qui illumine ma vie,

À mon très chère mari source de tendresse , de courage et patience ,

À mon Futur Bébé,

À mes très chers frères fawaz, Amazighe, Syfax,

À mes sœurs Thelali , Kenza,

À ma très chère Belle Famille,

À ma chérie binome Nabila,

*À ma précieuse famille, mes cousins et cousines , à tous mes amis et à tous mes
enseignants ,et à tout ceux que j'aime et qui m'aiment.*

Salima

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la Patience
pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

Je dédie notre travail à :

*À Mes très chers parents adorés qui m'ont fait bénéficié,
grâce à leur invocation et à leur bénédiction à avoir la confiance et l'espoir au cours de la
rédaction de ce travail leurs souhaite bonne santé et belle vie.*

À mon très chère mari source de tendresse, de courage et patience ,

À Mes très chères enfants Bedredin et dahbia ,

À mes frères Nadir, Nabil et Farhath ,

À mes soeurs Hakima et Fariza,

À ma Grand-mère et Grand-père ,

À toute la famille ,

À mes chers ami(e)s ainsi que ma chère binôme Salima.

Nabila

Remerciements

LOUANGE À Dieu, le miséricordieux, sans lui rien de tout cela n'aurait pu être.

Nous tenons à remercier vivement Melle TIAB Amal et Mme GASMI Badrina pour nous avoir honorés par leur encadrement, pour ses précieux conseils et ses aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Un merci particulier à nos parents, nos familles et amis pour leur amour, leurs sacrifices et leurs patiences.

Sans oublier aussi de remercier Mr ZIDOUN Halim qui nous ont toujours aidé et encourager.

N.S

TABLE DES MATIÈRES

Dédicaces	i
Remerciements	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Liste des Acronymes	ix
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	3
1.1 Introduction	3
1.2 Les Réseaux de capteurs sans fil	3
1.2.1 Définition d'un capteur	4
1.2.2 Architecture d'un capteur sans fil	4
1.2.3 Architectures d'un réseaux de capteurs sans fil	5
1.2.4 Type de communication dans les réseaux de capteurs sans fil	7
1.2.5 Pile protocolaire	7
1.3 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil	9
1.4 Contrainte et facteur de conception des réseaux de capteurs sans fil	10
1.5 Conclusion	11
2 Routage dans les RCSFs	12
2.1 Introduction	12
2.2 Définition du routage	12
2.3 Facteurs de conception de protocoles de routage	12
2.3.1 Tolérance aux pannes	12
2.3.2 Consommation d'énergie	13
2.3.3 Limitations de capacités des nœuds	13
2.3.4 Scalabilité	13

2.3.5	Connectivité	13
2.3.6	Hétérogénéité	14
2.4	Métriques d'efficacité des protocoles de routage	14
2.4.1	Métriques pour la consommation énergétique	14
2.4.2	Métrique basée sur le nombre de sauts	15
2.4.3	Métrique basée sur le Perte de paquets	15
2.4.4	Métrique basée sur le Délai de bout-en-bout EED	15
2.5	Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil	15
2.5.1	Classification selon la structure du réseau	16
2.6	Le protocole de routage LEACH	18
2.6.1	Classification selon les fonctions des protocoles	20
2.6.2	Classification selon l'établissement de la route	20
2.6.3	Classification selon l'initiateur de communication	21
2.7	Conclusion	22
3	Simulation dans les RCSF	23
3.1	Introduction	23
3.2	La simulation	23
3.2.1	Les types de simulation	24
3.2.2	Contraintes et défis de la simulation dans les réseaux de capteurs sans fil	25
3.2.3	Avantage et inconvénients de la simulation	25
3.3	Comparaison de quelques simulateurs existants	25
3.3.1	Le simulateur NS-2 (Network Simulator 2)	25
3.3.2	Le simulateur OMNeT++	26
3.3.3	Le simulateur J-Sim	27
3.3.4	Le simulateur TOSSIM	27
3.3.5	Le simulateur Glomossim	28
3.3.6	Le simulateur Prowler	29
3.3.7	Le simulateur TIKTAK	30
3.3.8	Le simulateur SENS	31
3.4	Tableau comparatif	33
3.5	Conclusion	33
4	Réalisation du simulateur et Interprétation des résultats	34
4.1	Introduction	34
4.2	Choix de Java	34
4.3	Les étapes de réalisation du simulateur	35
4.4	Les interface graphique du simulation	36
4.4.1	Principe de fonctionnement du protocole Leach	38
4.5	Simulation et discussion de résultats	39
4.5.1	Les paramètres de simulation	39
4.5.2	Métriques d'évaluation de performances	40
4.5.3	Résultats de simulation	40
4.5.4	Discussion des résultats	41
4.5.5	les résultats de LEACH	42
4.5.6	Amélioration de LEACH	43

4.6 Conclusion	44
Conclusion générale	45
Bibliographie	46

LISTE DES FIGURES

1.1	Réseaux de Capteur Sans Fil (RCSF)	4
1.2	Architecture des capteurs sans fil	4
1.3	Architecture d'un réseau de capteurs sans fil	6
1.4	types de communication dans réseaux de capteurs sans fil	7
1.5	Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs sans fil	8
2.1	Les approches de routage dans les réseaux de capteurs	16
2.2	protocole plat	17
2.3	protocole hiérarchique	18
2.4	Architecture du routage hiérarchique LEACH.	19
2.5	protocole basé sur la localisation.	19
3.1	les étapes de simulation.	24
3.2	Schéma fonctionnel du simulateur TIKTAK	31
3.3	Tableau comparatif	33
4.1	les principales fonctions du simulateur	35
4.2	l'interface graphique du simulation.	36
4.3	deploiement du réseau.	37
4.4	Routage de données.	38
4.5	L'interface de fichier Excel.	41
4.6	graphe d'énergie obtenue.	42
4.7	nombre de message non reçu durant la simulation.	43
4.8	nombre de calcules(temps) gagné	44

LISTE DES TABLEAUX

4.1	Les paramètres de la simulation.	39
-----	--	----

LISTE DES ACRONYMES

AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector .
BS	Base Station .
CH	Cluster Head .
DCSE	Department of Computer Science and Engineering.
DSR	Dynamic Source Routing.
ED	Energie Disponible.
EN	Energie Nécessaire.
EED	End-to- End Delay.
GloMoSim	Global Mobile Information system Simulator.
GPS	Global Positioning System.
GUI	Guided User Interface.
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Dierarchy.
NED	Network Description.
NS	Network Simulator.
OSI	Open Systems Interconnection scss.
Parsec	Parallèle Simulation Environnement for Complexe System.
QoS	Quality of service 'Qds ' based routing.
QoS	Quality of service .
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil.
SAR	Sequential Assignment Routing.
TCL	Tool Command Langage .
TCP/IP	Transport Control Protocol/Internet Protocol .
WSN	Wireless Sensors Networks.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs) sont une nouvelle technologie qui a surgit après les grands progrès technologiques concernant le développement des capteurs intelligents, des processeurs puissants et des protocoles de communications sans fil. Ce type de réseau composé de certaines ou de milliers d'éléments, a pour but la collecte de données de l'environnement, leur traitement et leur dissémination vers le monde extérieur.

Les RCSFs sont constitués de plusieurs capteurs minuscules ou nœuds ayant une caractéristique essentielle résidant dans l'absence d'infrastructure fixe et ayant une topologie changeante due à la mobilité des capteurs.

Les principaux problèmes dans les réseaux de capteurs sans fil sont le protocole de routage, l'énergie consommée par le nœud, la sécurité, l'agrégation de données, la mobilité imprévisible des nœuds, etc. Ces capteurs sont parfois déployés dans des zones hostiles. Il est donc nécessaire d'avoir une stratégie efficace qui prend en considération l'énergie du réseau pour augmenter sa durée de vie en réduisant la perte d'énergie tout en étant réactive aux changements de l'environnement.

En effet, il est très important d'étudier le comportement de ses protocoles et d'évaluer leurs performances avant leur déploiement sur les RCSFs, afin de comprendre et d'améliorer les éventuels problèmes qui pourraient affecter ces réseaux. En effet, il existe trois approches d'évaluation des performances : les modèles analytiques, les simulations et les mesures sur un système réel.

Notre travail entre dans le cadre du projet de fin d'études et s'inscrit dans le contexte de la simulation dans les RCSFs. Tout d'abord, nous avons élaboré un état de l'art des RCSFs

et des techniques de routage existantes. Nous avons également parcouru et critiqué certains simulateurs présentés dans la littérature et ce qui nous a menés à concevoir un tout nouveau simulateur en langage Java. Suite à cela nous avons implémenté le protocole de référence LEACH et nous avons mesuré ses performances. Enfin nous avons conçu une amélioration de Leach et nous avons montré son gain en termes, d'énergie moyenne consommée et de nombre de messages reçus.

La suite de ce mémoire est structurée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre représente une partie introductive pour les réseaux de capteurs, nous présentons, leurs architectures, leurs caractéristiques, leurs domaines d'application ainsi que les contraintes de conception d'un tel type de réseau.
- Le deuxième chapitre est consacré à la problématique du routage dans les RCSFs. Les facteurs influents sur la conception des protocoles de routage ainsi que les différentes classes de ces protocoles.
- Le troisième chapitre présente une comparaison entre quelques simulateurs utilisés dans les RCSFs, en donnant leurs avantages et leurs inconvénients.
- Le quatrième chapitre, quant à lui, est consacré à la présentation de notre simulateur et l'évaluation des performances du protocole Leach ainsi que de sa version améliorée que nous avons conçu et nommé Leach amélioré.

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

1.1 Introduction

La technologie des réseaux de capteurs sans fil est un domaine en plein essor, de plus en plus d'applications utilisent cette technologie. En effet, les avancées électroniques et informatiques d'aujourd'hui sont capables de développer de minuscules capteurs capables de capter des données, calculer des informations à l'aide de ces données collectés et de communiquer à travers un réseau.

Dans ce chapitre, nous décrivons les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures, leurs caractéristiques, leurs domaines d'application, leurs contraintes de conception ainsi que les types de communication utilisés.

1.2 Les Réseaux de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est composé d'un ensemble de nœuds capteurs, limités en capacité mémoire et de calcul, devant être économes en énergie, ce qui les contraint à exploiter une faible puissance de transmission et des portées et des débits modestes. Ces nœuds capteurs sont organisés en champs. Chacun de ces nœuds est autonome et a la capacité de collecter des données et de les transférer au nœud puits (station de base) par l'intermédiaire d'une architecture multi-sauts. Le puits transmet ensuite ces données par Internet ou par satellite à un ordinateur central "Gestionnaire de tâches" pour analyser et évaluer ces données et prendre des décisions,(voir la figure 1.1) [1].



FIGURE 1.1 – Réseaux de Capteur Sans Fil (RCSF)

1.2.1 Définition d'un capteur

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, humidité, vibration, etc.), et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Chaque capteur assure les trois principales fonctions de base qui sont : l'acquisition de données, les traitements sur ces données et leurs communications aux stations de bases [1].

1.2.2 Architecture d'un capteur sans fil

Un capteur est composé de quatre éléments ou modules de base qui sont : l'unité de captage (Sensing Unit), l'unité de traitement (Processing Unit), l'unité de transmission (Transceiver Unit) et l'unité de contrôle d'énergie (Power Unit)[2].

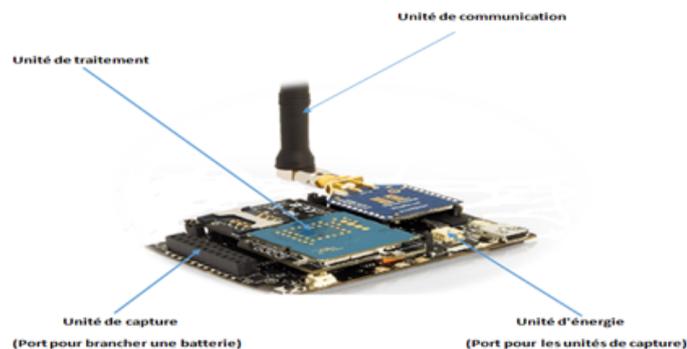


FIGURE 1.2 – Architecture des capteurs sans fil

- **Unité de captage :** Elle est généralement composée de deux sous-unités : le capteur lui-même et un convertisseur Analogique/Numérique. Le capteur est responsable de fournir des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement [2].
- **Unité de traitement :** L'unité de traitement est composée d'un processeur et d'une mémoire intégrant un système d'exploitation spécifique (TinyOS, par exemple). Cette unité possède deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de communication. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de communication. Cette unité est également chargée d'exécuter les protocoles de communication qui permettent de faire collaborer le capteur avec d'autres capteurs et peut aussi analyser les données captées [2].
- **Unité de transmission :** L'unité de transmission est composée d'antennes, elle est chargée d'effectuer toutes les émissions et les réceptions de données sur un support de transmission sans fil. L'unité de transmission, qui est un élément de base, peut-être de type optique. Les communications de ce type sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Par conséquent, elles ne peuvent pas établir de liaisons à travers des obstacles. Ces communications peuvent être également de type radiofréquence [2].
- **Unité de contrôle d'énergie :** Elle effectue des opérations de contrôle de l'énergie restante et de mesure de la durée de vie du capteur. Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique généralement une batterie, pour alimenter tous ses composants. Cependant, cette ressource énergétique est limitée et dans la plupart des cas irremplaçable. L'unité de contrôle d'énergie constitue donc l'un des systèmes les plus importants, elle est responsable de répartir l'énergie sur les autres modules et de réduire les dépenses énergétiques (par la mise en veille des composants inutiles, par exemple). Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé, telles que les cellules solaires [2].

1.2.3 Architectures d'un réseaux de capteurs sans fil

Il existe deux types d'architectures pour les réseaux de capteurs : les réseaux de capteurs plats et les réseaux de capteurs hiérarchiques.

- **Les réseaux de capteurs plats**

Un réseau de capteurs est composé d'un nombre souvent très important de nœuds qui sont soit posés à un endroit précis, soit dispersés aléatoirement. Ce dispersement aléatoire des capteurs nécessite que le protocole utilisé pour les réseaux de capteurs possède des algorithmes d'auto organisation. Afin de résister aux déploiements, ces capteurs doivent être très

solides et de plus, ils doivent aussi pouvoir survivre dans les conditions les plus extrêmes dictées par leur environnement d'utilisation (feu ou eau par exemple). Ces nœuds capteurs sont organisés en champs " sensor fields " (voir figure suivant). Chacun de ces nœuds a la capacité de collecter des données et de les transférer au nœud passerelle (dit " sink " en anglais ou puits) pas l'intermédiaire d'une architecture multi-sauts. Le puits transmet ensuite ces données par internet ou par satellite à l'ordinateur central " Gestionnaire de taches " pour analyser ces donner et prendre des décisions [3].

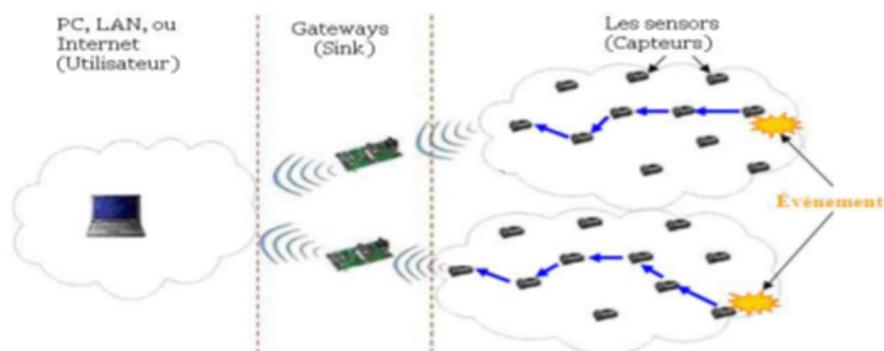


FIGURE 1.3 – Architecture d'un réseau de capteurs sans fil .

• Les réseaux de capteurs hiérarchiques

Le point clé dans un réseau de capteurs hiérarchique est la différenciation entre les nœuds du réseau. Cette distinction peut se faire au niveau physique ou au niveau logique :

- Au niveau physique :lorsqu'il y a une différenciation au niveau matériel, les nœuds sont hétérogènes et différents de par leurs capacités et fonctionnalités. De ce fait, certains nœuds disposent de caractéristiques supplémentaires et peuvent réaliser des tâches plus complexes que d'autres nœuds. Cependant, il existe un coût supplémentaire, au niveau du prix et de la consommation énergétique, pour les dispositifs ayant plus de fonctionnalités [3].
- Au niveau logique :dans un réseau homogène les nœuds peuvent également être hiérarchisés selon leurs fonctionnalités. Dans un découpage en clusters, par exemple, permettant de partitionner le réseau et donc de le structurer, certains nœuds appelés cluster-Head ou encore têtes de clusters ont pour rôle d'organiser leurs clusters respectifs. Les cluster-Head qui sont des nœuds de niveau supérieur dans la hiérarchisation peuvent communiquer exclusivement entre eux [3].

1.2.4 Type de communication dans les réseaux de capteurs sans fil

En générale, dans les réseaux de capteur sans fil, deux types de nœuds sont identifiés logiquement : les nœuds qui principalement transmettent leur propre donnée capturée (nœuds capteurs) et les nœuds qui transmettent les messages aux autres nœuds (nœuds relais). Les données capturées sont acheminés depuis les nœuds sources jusqu'aux nœuds destinataires à travers les nœuds intermédiaires, créant ainsi une topologie multi-sauts. Comme illustré dans la figure 1.5, cette organisation logique implique quatre types de communication [3] :

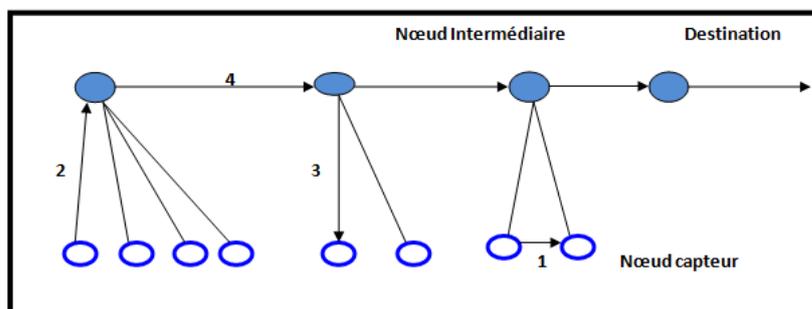


FIGURE 1.4 – types de communication dans réseaux de capteurs sans fil

- 1- **La communication d'un nœud capteur avec un autre nœud capteur** : ce type de communication directe est employé pour des opérations locales, par exemple pendant le processus de clustérisations "clustering", ou le processus de création de routes.
- 2- **La communication d'un nœud capteur avec un nœud intermédiaire** : les données capturées sont transmises d'un capteur à un nœud intermédiaire. Ce type de communication est souvent unicast.
- 3- **La communication d'un nœud intermédiaire avec nœud capteur** : les requêtes et la signalisation des messages sont souvent multicast. Elles sont diffusées par les nœuds intermédiaires un sous-ensemble de nœuds capteurs.
- 4- **La communication d'un nœud intermédiaire avec nœud intermédiaire** : la communication entre ces nœuds est la plupart du temps unicast.

1.2.5 Pile protocolaire

Le rôle de la pile protocolaire consiste à standardiser la communication entre les composants du réseau, afin que les différents constructeurs puissent mettre au point des produits (logiciels ou

matériels) compatibles. Ce modèle comprend cinq couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI (Open Systems Interconnections), ainsi que trois couches pour la gestion de la puissance d'énergie, la gestion de la mobilité et la gestion des tâches (interrogation du réseau de capteurs). Le but d'un système en couche est de séparer le problème en différentes parties selon leur niveau d'abstraction. Chaque couche du modèle communique avec une couche adjacente. Chaque couche utilise ainsi les services des couches inférieures, et en fournit à celle de niveau supérieur [5].

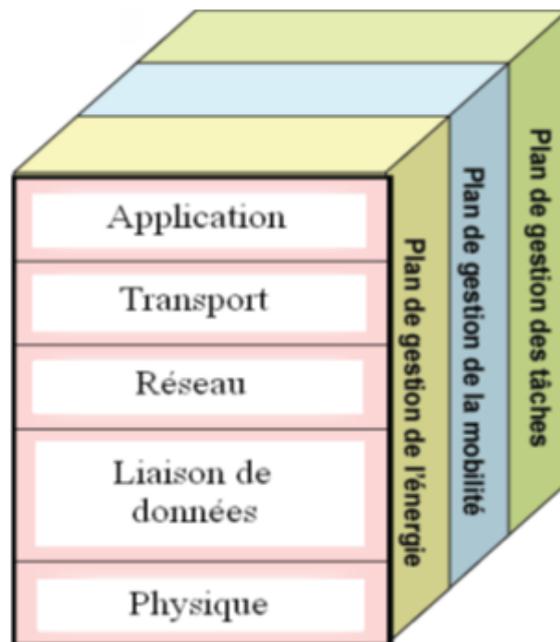


FIGURE 1.5 – Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs sans fil

- **La couche liaison** : spécifie comment les données sont expédiées entre deux nœuds dans une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des données, du contrôle d'erreur de l'accès au media. Elle assure la liaison point à point et multipoint dans un réseau de communication [4].
- **La couche réseau** : dans la couche réseau, le but principal est de trouver une route et une transmission fiable des donnée captées des nœuds capteurs vers le puits, en optimisant l'utilisation de l'énergie des capteurs. Ce routage diffère de celui des réseaux de transmission ad hoc sans fils par les caractéristiques suivantes :
 - Il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global pour le grand nombre de nœuds.
 - Les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement des données mesurées de sources multiples à un puits particulier.

- les multiples capteurs peuvent produire de mêmes données à proximité d'un phénomène (redondance) .
- les nœuds capteurs exigent ainsi une gestion soignée des ressources.
En raison de ces différences, plusieurs nouveaux algorithmes ont été proposés pour le problème de routage dans les réseaux de capteurs [4].
- **La couche transport** : cette couche est chargée du transport des données, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission [4].
- **La couche application** : cette couche assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels .
En plus de ces cinq couches, la pile protocolaire des réseaux de capteurs comporte trois niveaux : le niveau de gestion d'énergie, le niveau de gestion de mobilité et le niveau de gestion des tâches [4].
- **Le niveau de gestion d'énergie** : le niveau de gestion d'énergie adopte quelques mécanismes pour contrôler et essayer d'optimiser l'énergie consommée par les capteurs. Ainsi, lorsqu'un capteur atteint un niveau critique d'énergie il informe son voisin de son incapacité à participer au routage[4].
- **Le niveau de gestion de la mobilité** : le niveau de gestion de mobilité détecte et enregistre les mouvements des nœuds capteurs afin de leur permettre de garder continuellement un chemin vers le nœud puits et de maintenir une image récente de la carte du réseau [4].
- **Le niveau de gestion des tâches** : lors d'une opération de capture dans une région donnée, les nœuds composant le réseau ne travaillent pas obligatoirement au même rythme, cela dépend essentiellement de la nature du capteur, de son niveau d'énergie et de la région dans laquelle il a été déployé. Le niveau de gestion des tâches doit donc assurer l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds concernés afin d'optimiser la consommation d'énergie [4].

1.3 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil

Le champ d'applications des réseaux de capteurs est de plus en plus élargi grâce aux évolutions techniques que connaissent les domaines de l'électronique et des télécommunications. Parmi ces évolutions, on peut citer la diminution de taille et du coût des capteurs, ainsi que l'élargissement des gammes de capteurs disponibles (mouvement ,températures, ...) et l'évolution des supports de communication sans fil. En effet, les applications des réseaux de capteurs peuvent être militaires médicales, environnementales, commerciales, etc [5].

- **Applications militaires**

Un réseau de capteurs déployé dans un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par

exemple d'y surveiller tous les mouvements (alliés ou ennemis), ou d'analyser le champ de bataille avant d'y envoyer du renfort [5].

- **Applications médicales**

Il existe déjà dans le monde médical, des gélules multi-capteurs pouvant être avalées qui permettent, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur du corps humain [5].

- **Applications environnementales**

Des capteurs de températures peuvent être dispersés à partir d'avions dans le but de détecter d'éventuels problèmes environnementaux dans le domaine couvert par les capteurs dans une optique d'intervenir à temps afin d'empêcher que d'éventuels incendie, inondation, volcan ou tsunami ne se produisent [5].

- **Applications commerciales**

Des nœuds capteurs peuvent être utilisés pour améliorer les processus de stockage et de livraison. Le réseau peut ainsi être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'une marchandise. Un client attendant une marchandise peut alors avoir un avis de livraison en temps réel et connaître la position des marchandises qu'il a commandées [5].

- **Applications transportés**

Il est possible d'intégrer des nœuds capteurs au processus de stockage et de livraison. Le réseau ainsi formé, pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison [5].

- **Applications agricoles**

Dans les champs agricoles, les capteurs peuvent être semés avec les graines. Ainsi, les zones sèches seront facilement identifiées et l'irrigation sera donc plus efficace [5].

1.4 Contrainte et facteur de conception des réseaux de capteurs sans fil

La conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil sont influencées par plusieurs paramètres. Ces facteurs servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les RCSF [6].

- **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 nœud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.
- **La tolérance aux fautes :** certains nœuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique ou une interférence ces problèmes ne doivent pas affecter le reste du réseau, c'est le principe de la tolérance aux fautes.
- **Ressources limitées :** en plus de l'énergie, les nœuds capteurs ont aussi une capacité de traitement et de mémoire limitée. en effet, les industriels veulent mettre en œuvre des capteurs

simples petits et peu coûteux qui peuvent être achetés en masse [6].

- **Bande passante limitée** : afin de minimiser l'énergie consommée lors du transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteur ou les fréquences de transmission ne sont pas importantes [6].
- **Le facteur d'échelle** : Le nombre de nœuds déployés pour une application peut atteindre des milliers. Dans ce cas, le réseau doit fonctionner avec des densités de capteurs très grandes. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter-nodales et nécessite que la station de base soit équipée de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues [6].
- **Topologie dynamique** : La topologie des réseaux de capteurs peut changer au cours du temps pour les raisons suivantes [6] :
 - Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (champ de bataille par exemple), la défaillance d'un nœud capteur est, donc très probable.
 - Un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie.
 - Dans certaines applications, les nœuds capteurs et les stations de base sont mobiles.
- **Agrégation de données** : Dans les RCSFs, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et ainsi d'améliorer sa durée de vie. L'une des techniques utilisées pour réduire la transmission d'informations redondantes est l'agrégation des données. Avec cette technique, les nœuds intermédiaires agrègent l'information reçue de plusieurs sources. Cette technique est connue aussi sous le nom de fusion de données [6].

1.5 Conclusion

Nous avons essayé à travers ce chapitre de présenter les réseaux de capteurs sans fil : leurs architectures et leurs applications. Nous avons discuté également les principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs sans fil. Dans le chapitre suivant, nous décrirons la problématique du routage dans les réseaux de capteurs sans fil.

ROUTAGE DANS LES RCSFs

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art sur le routage dans les réseaux de capteurs sans fils. nous commenceront par énumérer les facteurs qui influencent la conception des protocole de routage, par la suite nous présentons les métriques d'efficacité des protocoles de routages conçus pour les RCSFs . Enfin, nous finirons par une classification des protocoles de routage.

2.2 Définition du routage

Le routage est un processus qui permet de sélectionner des chemins dans un réseau pour transmettre des données depuis un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destinataires. On distingue généralement deux entités : L'algorithme de routage et le protocole de routage . Dans les réseaux de capteurs, les caractéristiques comme la densité importante des nœuds, leurs autonomies énergétiques limitées et la topologie qu'ils forment, exigent des protocoles de routage spécifiques, différents de ceux déployés dans les réseaux usuels. De ce fait, le développement de nouveaux protocoles de routage s'avère indispensable. Ces protocoles doivent tenir compte de l'aspect fonctionnel de ces réseaux tout en optimisant les calculs nécessaires pour choisir la route la plus optimale [7].

2.3 Facteurs de conception de protocoles de routage

2.3.1 Tolérance aux pannes

La propriété de tolérance aux pannes est définie par l'aptitude du protocole de routage À maintenir ses fonctionnalités, en cas de panne de quelques nœuds. Le but de la tolérance aux pannes est d'éviter la faille totale du système malgré la présence de fautes dans un sous ensemble de

ses composants élémentaires. Les pannes sont tolérées puisqu'elles sont plus fréquentes à cause de l'épuisement rapide d'énergie et à la nature contraignante de l'environnement qui expose les nœuds à des endommagements physiques. Pour cela les protocoles de routage conçus doivent atteindre le niveau de tolérance aux pannes requis selon l'application. A cet effet, les protocoles de routage doivent, en cas de défaillance de liens de communication, procéder à la formation de nouvelles routes entre les nœuds [8].

2.3.2 Consommation d'énergie

Il est à noter que l'efficacité en consommation d'énergie représente un facteur de performance significatif. C'est pourquoi les concepteurs peuvent au moment du développement des protocoles, négliger les autres facteurs au détriment de cette contrainte. L'utilisation des protocoles basés sur les techniques de conservation d'énergie lors de la communication et le calcul est essentiel [8].

2.3.3 Limitations de capacités des nœuds

Les nœuds ont des capacités de calcul, de stockage et de communication limitées. Les concepteurs de protocoles de routage doivent englober des opérations simples et peu exigeantes en capacité de calcul et de stockage.

2.3.4 Scalabilité

Les applications des RCSF nécessitent en général un déploiement dense des nœuds. Les protocoles de routage doivent donc être très scalables. Autrement dit, les protocoles de routage ne devraient pas souffrir d'une dégradation de performances dans le cas d'endommagement de nœuds aussi bien qu'avec un nombre plus élevé de nœuds [8].

2.3.5 Connectivité

Le nombre important de nœuds dans un RCSF, fait qu'ils sont généralement dispersés de façon aléatoire, et ne sont pas uniformément répartis sur le champ de captage. Ce qui implique que certaines régions du champ de déploiement puissent bénéficier d'une meilleure connectivité. Par conséquent, les protocoles de routage conçus pour les RCSF doivent avoir une capacité d'auto-organisation qui les adapte à la distribution aléatoire des nœuds et à la topologie dynamique du réseau [8].

2.3.6 Hétérogénéité

Généralement, les nœuds d'un RCSF sont homogènes et disposent des mêmes capacités de calcul, de stockage et de ressources énergétiques. Cependant, selon les besoins des applications, les nœuds peuvent avoir des rôles différents. Ainsi, selon la tâche assignée au capteur, les besoins en ressources de calcul, de stockage, de communication et d'énergie peuvent varier d'un nœud à un autre. Pour remédier à ce problème, une solution envisagée par certaines applications consiste à intégrer des nœuds spéciaux plus puissants que les autres et qui seront chargés d'effectuer les tâches les plus coûteuses, en termes de ressources énergétiques. Cependant, l'intégration d'un ensemble de nœuds hétérogènes dans un seul réseau impose de nouvelles contraintes liées au routage de données. Par conséquent, la conception des protocoles de routage doit prendre en compte les différents types de nœuds et les contraintes qui en résultent [9].

2.4 Métriques d'efficacité des protocoles de routage

Cette section étudie les métriques communes utilisées pour mesurer l'efficacité des protocoles de routage. Un calcul de métrique est un algorithme qui traite un coût associé à un certain chemin de routage. Les protocoles de routage permettent aux nœuds de comparer les métriques calculées afin de déterminer les routes optimales à emprunter. Plusieurs métriques peuvent affecter le routage, en termes d'énergie, délai, longueur du chemin, etc [11].

2.4.1 Métriques pour la consommation énergétique

Les protocoles de routage utilisent cet ensemble de métriques pour minimiser la consommation d'énergie pendant le routage. L'idée est de calculer l'énergie disponible (ED) pour chaque nœud du réseau et l'énergie nécessaire (EN) pour les transmissions des paquets entre une paire de nœuds. Les routes entre les nœuds et le puits sont établies et chacune d'elles est caractérisée par la somme des ED des nœuds qui la constituent et par la somme des EN des liaisons qui la construisent. La consommation d'énergie suit plusieurs approches dont on peut citer [10] :

- **Par considération de puissance** : La route choisie est celle caractérisée par la somme de l'énergie disponible (ED) la plus élevée.
- **Par considération du coût** : La route choisie est celle caractérisée par la plus petite somme de l'énergie nécessaire (EN).
- **Par considération de puissance et du coût** : Cette métrique est la combinaison des deux métriques précédentes. La route choisie est celle caractérisée par la plus petite somme de l'énergie nécessaire (EN) et la plus grande somme de l'énergie disponible (ED).

2.4.2 Métrique basée sur le nombre de sauts

Les protocoles de routage utilisent cette métrique pour minimiser le nombre de sauts pendant le routage. L'idée est de calculer le nombre de nœuds intermédiaires pouvant être traversés lors d'une transmission d'un paquet du nœud source vers le nœud puits. La route choisie est celle qui contient un nombre minimum de nœuds (minimum de sauts) [11].

2.4.3 Métrique basée sur le Perte de paquets

Les protocoles de routage utilisent cette métrique dans le but de minimiser le nombre de paquets de données perdus lors du transfert depuis une source vers une destination pendant le routage. L'idée est de calculer le ratio des paquets perdus et des paquets émis transitant dans le réseau. Autrement dit, on calcule le nombre de paquets perdus sur le nombre de paquets transmis lors d'une transmission. Dans le cas où le taux de perte de paquets est élevé, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes qui permettent de minimiser les collisions [12].

2.4.4 Métrique basée sur le Délai de bout-en-bout EED

L'EED (End-to-End Delay) est le temps moyen nécessaire pour qu'un paquet de données soit acheminé à partir de la source vers la destination. Cette technique est parmi les métriques les plus connues dans les réseaux sans fil. Les protocoles de routage l'utilisent pour minimiser le temps de propagation des paquets de données échangés pendant le routage [12].

2.5 Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Récemment, les protocoles de routage pour les RCSFs ont été largement étudiés. Les approches proposées présentent des points communs et donc peuvent être classifiées suivant un certain nombre de critères. La figure 2.1 ci-dessous résume une classification qui se base sur quatre critères : la structure du réseau, les fonctions des protocoles, l'établissement de la route et l'initiateur de communication [13].

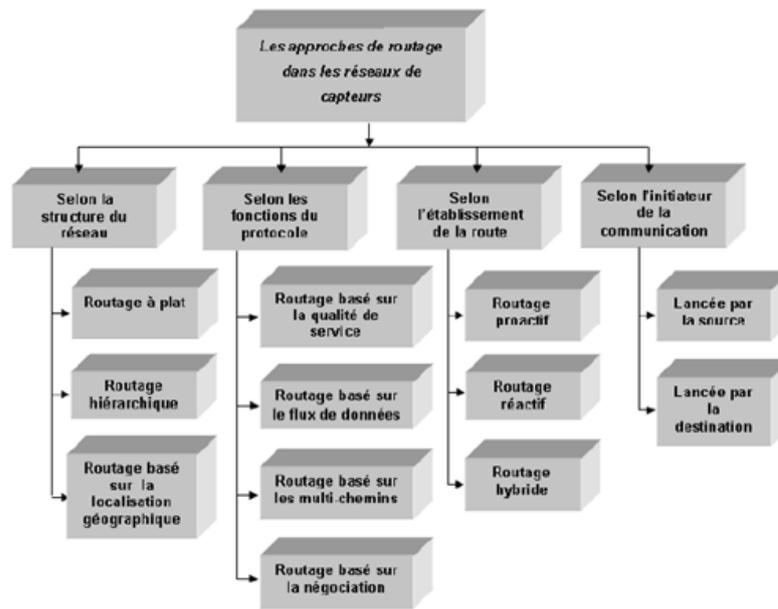


FIGURE 2.1 – Les approches de routage dans les réseaux de capteurs

2.5.1 Classification selon la structure du réseau

La topologie détermine l'organisation logique adaptée par les protocoles de routage afin d'exécuter les différentes opérations de découverte de routes et de transmission de données. Elle joue un rôle significatif dans le fonctionnement d'un protocole. Les protocoles de cette classe peuvent être classifiés en trois catégories : protocole à plat, protocole hiérarchique et protocole basé sur la localisation géographique [14].

- Protocole plats :** Appelé également routage centré données (data centric) où tous les nœuds ont les mêmes tâches à accomplir. C'est la première approche utilisée dans l'acheminement des données dans les RCSF. Elle se base sur la collaboration de tous les nœuds du réseau. Les propriétés des données sont spécifiées par un système de dénomination par attribut (attribut, valeur) en raison de la difficulté d'affecter un identificateur global à chaque nœud vu leur nombre important. Parmi leurs avantages, la simplicité d'où la possibilité d'établir des communications sans surcoût où chaque nœud n'aura besoin que des informations de ses voisins directs. L'inconvénient est l'épuisement des ressources en énergie des nœuds proches de la station de base car tout le trafic vers cette dernière passe obligatoirement par eux [14].

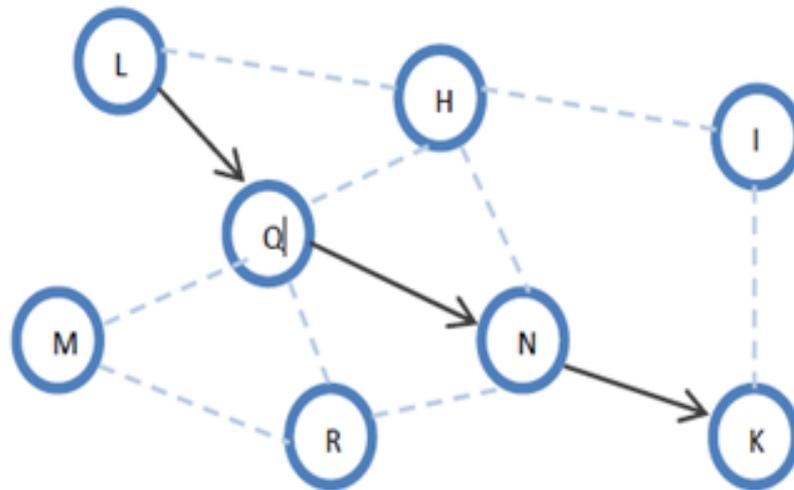


FIGURE 2.2 – protocole plat

- Protocole hiérarchique :** Dans une topologie hiérarchique, les nœuds ont des différents rôles. En effet, certains nœuds sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières. Une des méthodes les plus utilisées dans cette topologie est le clustering. Il consiste en un partitionnement du réseau en groupes appelés clusters. Un cluster est constitué d'un chef (clusterhead) et de ses membres. Suivant l'application, les membres peuvent être des voisins directs du chef ou pas. Cette topologie présente beaucoup d'avantages, tel que l'agrégation des données collectées ainsi qu'une grande scalabilité. Son inconvénient majeur est la surcharge des clusterheads qui induit un déséquilibre de la consommation d'énergie dans le réseau. Pour remédier à ce problème, les clusterheads peuvent être des capteurs spécifiques avec plus de ressources énergétiques et plus de capacités de traitement ou bien ils peuvent être élus dynamiquement et ainsi garantir un équilibre de la consommation d'énergie et augmenter la tolérance aux pannes. Un exemple de cette topologie est donné dans la Figure 2.3 ci-dessous. Pour que les paquets générés par le nœud F atteignent le nœud L, ils doivent passer par les passerelles P, S et R. Parmi les protocoles qui utilisent cette topologie : LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [14].

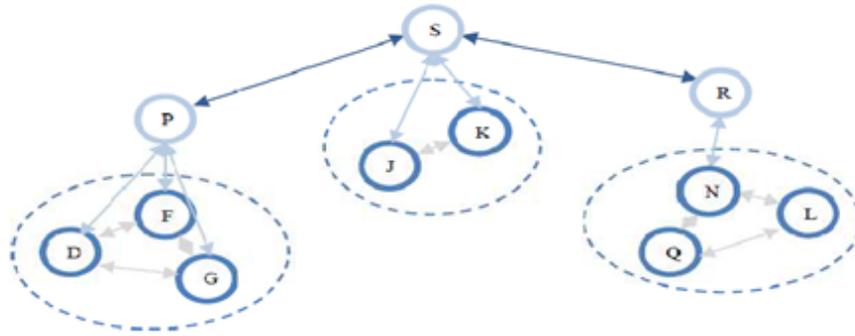


FIGURE 2.3 – protocole hiérarchique .

2.6 Le protocole de routage LEACH

La hiérarchie de regroupement d'adaptation à faible énergie (LEACH) proposé par Heinzelman et al. [1] est un protocole de routage hiérarchique bien connu appliqué dans les RCSF. LEACH divise le réseau en zones et clusters de façon distribuée, des nœuds CH (Cluster-Head) sont constitués puis utilisés comme relais pour atteindre le puits en optimisant la consommation d'énergie suivant un algorithme qui utilise la rotation randomisée des têtes de groupe (CH) pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds du réseau. Un nœud décide quel cluster rejoindre en se basant sur la puissance des signaux reçus. A la formation des groupes comme indique la figure 2.4, tous les nœuds non-CH transmettent leurs données à la tête du groupe. Quand le CH reçoit les données de tous les membres du groupe, il effectue des fonctions de traitement sur les données (agrégation et compression des données), et les transmet à la station de base (BS) selon une communication unicast (à un seul saut)[26].

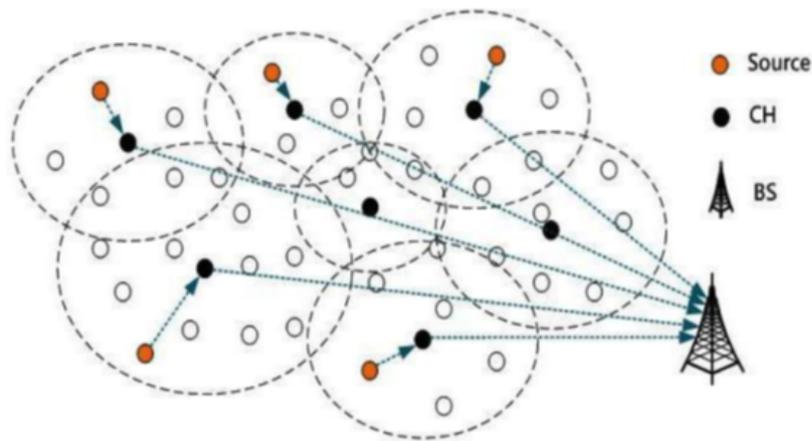


FIGURE 2.4 – Architecture du routage hiérarchique LEACH.

- Protocole géographique (basé sur la localisation) :** Avec ce type de routage, les informations de localisation des capteurs (positions géographiques) sont utilisées pour effectuer l'acheminement des données. Plusieurs solutions ont été proposées selon cette approche. Généralement les méthodes employées supposent que chaque capteur a la connaissance exacte de sa position, soit grâce à la technologie GPS (Global Positioning System) dans le cas où les capteurs sont équipés par des récepteurs GPS de faible énergie et permettant ainsi la communication avec un satellite. Sinon, grâce à des méthodes de localisation basées sur l'estimation de la distance aux autres nœuds. Dans de telles méthodes, la localisation est assurée par une estimation de la distance séparant deux capteurs, en fonction des propriétés du signal reçu (temps de propagation, atténuation du signal, etc.), ou en fonction de l'angle d'arriver du message [14].

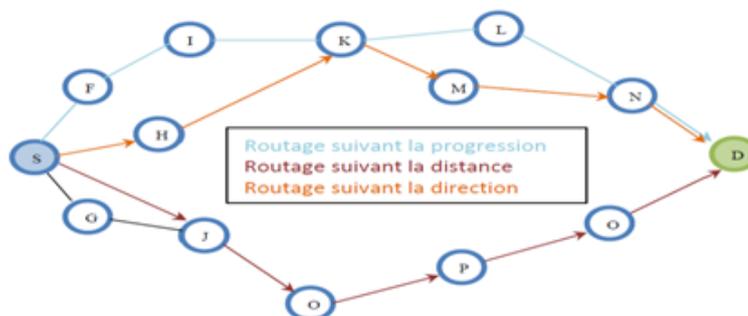


FIGURE 2.5 – protocole basé sur la localisation.

2.6.1 Classification selon les fonctions des protocoles

Le mode de fonctionnement définit la manière avec laquelle les données sont propagées dans le réseau. Selon ce critère, les réseaux de capteurs sans fils peuvent être regroupés en quatre catégories : Routage multi-chemins (Multipath), Routage basé sur les requêtes, routage basé sur la négociation (Négociation based routing), Routage basé sur la Qualité de service 'Qds' (Quality of service 'Qds' based routing) [15].

- **Routage basé sur la Qds (Qualité de service) :** Le principe des protocoles de routage avec QoS se base sur le fait que le réseau doit être capable de satisfaire certaines métriques (latence énergie des nœuds, bande passante, etc.) tout en acheminant le maximum de données vers la station de base. Il existe plusieurs protocoles de ce type dans la littérature, (SAR) est l'un des premiers protocoles de routage qui utilisent la notion de qualité de service dans les décisions de routage [15].
- **Routages multi-chemin :** Le routage multi chemin est devenu une technique prometteuse dans les RCSFs. Le déploiement dense de nœuds capteurs permet de construire plusieurs chemins entre chaque nœud capteur et le sink. Cette technique est utilisée par des applications avec différents objectifs : amélioration de la fiabilité de transmission des données, fourniture d'un routage tolérant aux pannes, contrôle le support de la qualité de service dans les RCSF, etc [15].
- **Routage basé sur la négociation :** Ces protocoles emploient des descripteurs de données à un niveau élevé afin d'éliminer la transmission des données redondantes sur la base de la négociation. Des décisions de communication sont également prises sur la base des ressources disponibles au niveau des nœuds capteurs. Donc, l'idée principale du routage via la négociation est de supprimer l'information double et d'empêcher l'envoi des données redondantes au prochain capteur ou à la station de base, en échangeant une série de messages de négociation avant même la transmission effective des données [15].
- **Routage basé sur les Requêtes :** Dans le routage basé sur la requête, le nœud destinataire Sink envoie une requête de demande de données qui sera propagée dans le réseau, un nœud qui est responsable de la détection et la collecte de données, lit ces requêtes et si une correspondance est trouvée avec les données demandées dans la requête, il commence à envoyer les données vers le nœud demandé ou la station de base sink [15].

2.6.2 Classification selon l'établissement de la route

Suivant la manière de création et de maintien des chemins pendant le routage nous distinguons trois catégories de protocoles de routages : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les

hybrides.

- **Protocole proactif** : Ces protocoles de routage essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles au niveau de chaque nœud du réseau. Les routes sont sauvegardées même si elles ne sont pas utilisées. Chaque nœud du réseau maintient une table de routage pour toutes les destinations indépendamment de l'utilité des routes. Les protocoles proactifs sont adaptés aux applications qui nécessitent un prélèvement périodique des données. Et par conséquent, les capteurs peuvent se mettre en veille pendant les périodes d'inactivité, et leur dispositif de capture qu'à des instants particuliers [16].
- **Protocole réactif** : Egalement appelé routage à la demande, le routage réactif permet de créer les routes selon les besoins de l'application. Lorsqu'une requête est diffusée sur le réseau la procédure de découverte de routes est lancée par les nœuds concernés par cette requête et les réponses sont acheminées sur les routes créées. Cette procédure est lancée également pour des applications event-driven (applications orientées événements) pour chaque événement intéressant détecté. L'avantage d'établir des routes à la demande est la conservation d'énergie par rapport au routage proactif. La recherche de routes peut causer des lenteurs pour l'acheminement des données ce qui n'est pas approprié aux applications interactives et temps-réel [16].
- **Protocole hybride** : Ces protocoles combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour apprendre le proche voisinage (par exemple le voisinage à deux ou à trois sauts), ainsi, ils disposent de routes immédiatement dans le voisinage. Au-delà de la zone de voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes [16].

2.6.3 Classification selon l'initiateur de communication

Le paradigme de communication est déterminé par les contraintes sous les quelles les nœuds du réseau sont interrogés. Dans les RCSF, il peut être classé comme étant centré-nœuds, centré-données et basés-localisation [17].

- **Protocole Centré-nœuds** : Ce modèle est utilisé dans les réseaux conventionnels où il est important de connaître les nœuds communicants. Cependant, ce paradigme ne reflète pas la vision des RCSF quant à leurs applications où la donnée transmise est plus importante que l'émetteur. néanmoins, le paradigme centré-nœuds n'est pas totalement écarté, car certaines applications nécessitent une interrogation individuelle des nœuds [17].
- **Protocole Centré-données** : Ce modèle est utilisé dans les réseaux où il n'existe pas un système d'identification global, toutes les communications sont identifiées par leurs données l'interrogation et le routage doivent être réalisés en se basant sur cette propriété. Le réseau peut être vu comme une base de données distribuée où les nœuds forment des tables virtuelles

alimentées par les données captées. Le protocole Directed Diffusion est considéré comme l'un des protocoles de référence dans le routage centré-données [17].

- **Protocole Basé-localisation** : Ce paradigme est utilisé dans les applications où il est plus intéressant d'interroger le système en se basant sur la localisation des nœuds, et où on peut tirer profit des positions des nœuds pour prendre des décisions qui minimisent le nombre de messages transmis pendant le routage. Avant d'envoyer ses données à un nœud destination le nœud source utilise un mécanisme pour déterminer sa localisation. Il est donc nécessaire de se pencher sur une solution de localisation géographique dont le degré de précision dépend de l'application visée [17]. Il existe deux techniques de localisation : absolue où on peut utiliser un système GPS (Global Positioning System) ou, relative où les nœuds sont localisés approximativement suivant la direction ou la durée lors d'une transmission [18].

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les considérations de conception d'un protocole de routage ensuite nous avons présenté les différentes métriques d'efficacité des protocoles de routage, et enfin nous avons vu une classification des approches de routage dans les RCSFs. Nous nous intéressons dans le chapitre qui suit aux outils de simulation des RCSFs.

SIMULATION DANS LES RCSF

3.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil connaissent actuellement une très grande évolution. Le besoin, en termes de nouvelles méthodes d'évaluation de performances, est par conséquent croissant. Actuellement, trois méthodes principales peuvent être adoptées pour analyser les performances des réseaux de capteurs sans fil : les études analytiques, les expérimentations et la simulation. La simulation constitue actuellement la méthode la plus répandue et la plus pratique pour évaluer les performances des réseaux de capteurs sans fil.

3.2 La simulation

La simulation est une technique de modélisation largement utilisée dans l'évaluation de performances des systèmes informatiques et réseaux de communication. Il s'agit d'implanter un modèle simplifié du système à l'aide d'un programme de simulation adéquat. Cela permet de modéliser des situations très complexes que l'on ne peut résoudre analytiquement. De plus, le comportement transitoire des systèmes peut être évalué alors que les modèles analytiques sont généralement utilisés pour étudier le comportement stationnaire d'un système [19]. Le cycle de simulation passe par plusieurs étapes, comme elles sont illustrées sur la figure 3.1.

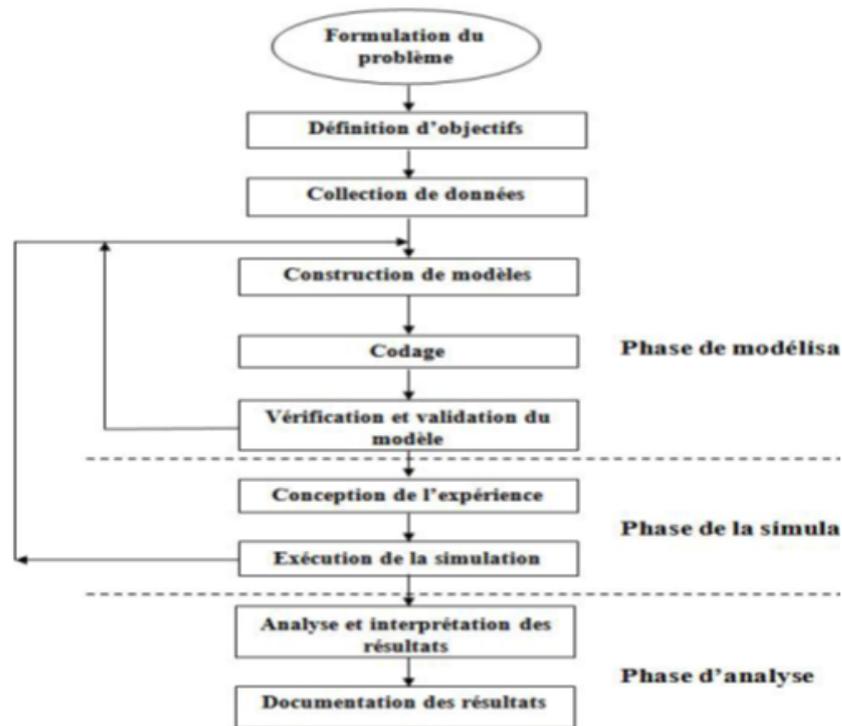


FIGURE 3.1 – les étapes de simulation.

3.2.1 Les types de simulation

Lorsque la simulation s'avère nécessaire pour évaluer un système réel, quatre principales méthodes de simulation peuvent être utilisées en fonction de la nature du système cible [20].

- 1- La Simulation de monte-carlo :** Elle se base sur la génération de nombres aléatoires afin de reproduire les résultats d'un calcul pour lequel les données sont incertaines.
- 2- La Simulation continue :** Elle permet d'analyser de manière continue le comportement d'un système, représenté sous la forme d'équations différentielles, au cours du temps.
- 3- La Simulation analytique :** Elle permet d'analyser des processus stochastiques à travers lesquels le système peut passer par différents états, comme par exemple les chaînes de Markov.
- 4- La simulation discrète :** Permet d'évaluer le comportement d'un système au cours du temps grâce à la génération d'événements.

3.2.2 Contraintes et défis de la simulation dans les réseaux de capteurs sans fil

La simulation des réseaux de capteurs sans fil introduit de nombreuses problématiques liées à la modélisation des nœuds, du médium radio et de l'environnement physique. Ainsi, un simulateur doit prendre compte de nombreux paramètres afin que la modélisation s'approche le maximum du system réel. Les différentes fonctionnalités que doit offrir un simulateur pour réseaux de capture son fil sont les suivants :

- Une modélisation complète de l'architecture des nœuds, à s'avoir les différentes couches du modèle OSI (application, routage, MAC...).
- Une modélisation des composants matériels des nœuds son fil comme la modélisation d'une batterie, d'un capture ou d'un processeur.
- Une modélisation détaillée du médium radio afin de prendre en compte les différents phénomènes liés à la propagation, aux collisions et aux interférences.
- Une modélisation de l'environnement physique. Par exemple, simuler la présence d'obstacles ou la propagation d'un feu d'incendie [21].

3.2.3 Avantage et inconvénients de la simulation

● Avantages

- Observations des états du système.
- Etudes des points de fonctionnement d'un système.
- Etudes de l'impact des variables sur les performances du système.
- Etude d'un système sans les contraintes matérielle [22].

● Inconvénients

- La conception de modèles peut nécessiter des compétences spéciales.
- Résultats pas forcément généralisable [22].

3.3 Comparaison de quelques simulateurs existants

3.3.1 Le simulateur NS-2 (Network Simulator 2)

Ns ou " network simulator " (encore connu sous le nom de ns-2) est un simulateur de réseau à événements discrets. Il est populaire dans le milieu de la recherche par son caractère extensible, sa nature de logiciel libre et la disponibilité d'une documentation riche sur internet. Ce simulateur est plutôt utilisé pour la simulation du routage et de protocoles d'émission/réception et surtout pour la recherche dans les réseaux ad-hoc. En effet, ns supporte plusieurs protocoles réseaux et permet

la simulation de réseaux sans fils et câblés aussi. Récemment, ns2 vient de mettre en place un modèle d'énergie pour les nœuds RCSF [2]. Ce modèle représente le niveau d'énergie dans chaque nœud à partir d'un niveau initial qui représente l'énergie disponible dans le nœud au début de la simulation.

Cette énergie est utilisée pour l'envoi et la réception des paquets jusqu'à l'épuisement [23].

- **Avantages**

- Un logiciel de simulation multicouche.
- Un outil complètement libre pour plusieurs plateformes.
- Possibilité d'ajouter des composants à la demande.
- Développement orienté objet.
- Du fait de sa popularité, de nombreux protocoles sont à priori disponibles pour NS-2.

- **Inconvénients**

- modélisation dans NS-2 reste une tâche complexe : il n'y a pas d'interface graphique.
- Une forte technicité est requise pour utiliser ce simulateur[23].

3.3.2 Le simulateur OMNeT++

Comme avec NS2, OMNeT ++ est également un partenariat public-source simulateur de réseau à base de composants avec le soutien de l'interface graphique. Son domaine d'application principal est les réseaux de communication. OMNeT ++ a une architecture générique et flexible qui fait son succès dans d'autres domaines comme les systèmes informatiques, les réseaux de files d'attente, des architectures matérielles, ou même des processus d'affaires[23].

- **Avantages**

- Architecture modulaire permettant l'intégration de nouveau modèle.
- Utilisation du C++ pour le développement du noyau.
- Les classes de base du simulateur peuvent être étendue et personnalisées.
- Conception de modèle rapprochant de la réalité.
- La mise en route avec ce simulateur est assez simple grâce à une conception claire du simulateur.
- Il fournit également une puissante bibliothèque d'interfaces graphiques pour l'animation et la gestion du débogage.

- **Inconvénients**

- Peu de modèles pour les réseaux sans fil.
- Description des modèles en langage NED.
- Il y a un manque cruel de protocoles disponibles dans la bibliothèque comparé à d'autres simulateurs [23].

3.3.3 Le simulateur J-Sim

J-Sim a été créé par le DCSE (Department of Computer Science and Engineering) de l'université West Bohemia de Pilsen, en République Tchèque. Il est entièrement gratuit. J-Sim permet de simuler des réseaux de l'ordre de 1000 nœuds. Le passage à l'échelle peut toutefois être amélioré. Le simulateur utilise quasi indifféremment deux langages : Java et TCL (Tool Command Language). L'architecture et le code sont suffisamment bien structurés pour permettre une prise en main relativement rapide. L'analyse des résultats est aisée et son architecture très modulable. De plus il permet d'utiliser n'importe quelle application Java comme générateur de trafic [24].

● Avantages

- Les modèles de J-Sim ont une bonne réutilisabilité et interchangeabilité.
- Facilite l'installation de simulation.
- Il contient un grand nombre de protocoles, ce simulateur peut également prendre en charge des diffusions de données, les routages et les simulations de localisation.
- Dans les RCSFs par des modèles de détail dans les protocoles de J-Sim. J-Sim peut aussi simuler les chaînes de radio et la consommation d'énergie dans les RCSFs.
- J-Sim fournit une bibliothèque de GUI, ce qui peut aider les utilisateurs à tracer et déboguer des programmes. La plate-forme indépendante facilite aux utilisateurs de choisir des composants spécifiques pour résoudre les problèmes individuels.
- En comparaison avec le NS-2, J-Sim peut simuler un grand nombre de nœuds capteurs, environ 500, et il peut économiser beaucoup de tailles de mémoire.

● Inconvénients

- Le temps d'exécution est beaucoup plus long que celui de NS-2.
- La conception inhérente de J-Sim rend l'ajout de nouveaux protocoles et composants plus difficile pour les utilisateurs.

3.3.4 Le simulateur TOSSIM

TOSSIM est le simulateur de TinyOs créé par l'université de Berkeley. Il permet de simuler le comportement d'un capteur (envoi/réception de messages via les ondes radios, traitement de l'information, etc.) au sein d'un réseau de capteurs. Pour une compréhension moins complexe de l'activité d'un réseau, TOSSIM peut être utilisé avec une interface graphique, TinyViz, permettant de visualiser de manière intuitive le comportement de chaque capteur au sein du réseau [24].

● Avantages

- TOSSIM permet de simuler fidèlement le comportement d'un réseau de capteurs.
- L'affichage des événements et des messages de débogage pour chaque capteur mais aussi simultanément pour l'ensemble des capteurs [24].

- L'interface graphique TinyViz, qui permet la visualisation des échanges radios, conjointement aux messages de débogage, ce qui permet, à chaque instant de la simulation, d'avoir une vue globale de l'activité du réseau étudié.
- TinyViz offre la possibilité de ralentir la simulation par un délai, afin d'observer le déroulement des évènements, ce qui est très intéressant lorsque le réseau est surchargé de messages.
- Le modèle open-source avec la documentation en ligne gratuite économise le Coût de la simulation.

- **Inconvénients**

- Deux capteurs ne peuvent pas exécuter deux applications différentes. En effet, il serait plus intéressant de distinguer les capteurs maîtres des capteurs esclave, en leur demandant d'exécuter des codes différents [24].
- TOSSIM est conçu pour simuler des comportements et des applications de TinyOS, et il n'a pas été conçu pour simuler les indicateurs de performance des autres nouveaux protocoles. Donc TOSSIM ne peut pas simuler correctement les questions de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

3.3.5 Le simulateur Glomossim

GloMoSim pour Global Mobile Information System Simulator [40] est un simulateur conçu à l'origine pour la simulation de réseaux mobiles à grande échelle. Il est construit à partir du langage Parsec. Le Parsec pour Parallèle Simulation Environnement for Complexe System est un langage de simulation parallèle dérivé du C. C'est un C auquel sont rajoutées des fonctions d'envoi, de réception de message et de gestion de timer [41]. L'élément de base dans le Parsec est l'entité. GloMoSim profite de cet aspect. Il est conçu suivant une conception modulaire et hiérarchique dans laquelle, un ensemble de nœuds sont agrégés au sein d'une seule entité Parsec : partition. De même, la pile de protocole est agrégée dans une seule entité de façon très fidèle au concept de structuration en couche du modèle Transport Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) [24]. Ces deux techniques d'agrégation lui confèrent une très bonne scalabilité (support pour la simulation de milliers de nœuds).

- **Avantages**

- Glomosim est un simulateur doté d'une grande portabilité (Sun Solaris, Linux, Windows) et sa licence est gratuite pour les universitaires.
- Il est capable de simuler un réseau purement sans fil, avec tous les protocoles de routage que cela inclut (AODV, DSR, algorithme de Bellman Ford (routage par vecteur de distance) ODMRP20, WRP21, FSR22, . . .) .
- Dans le futur, des nouvelles versions pourront simuler à la fois un réseau filaire et un réseau hybride.

- La plupart des systèmes réseaux de Glomosim sont construits en utilisant une approche basée sur l'architecture à sept couches du modèle OSI.
- L'intégration de modules supplémentaires ne nécessite pas de comprendre le fonctionnement du noyau : il suffit juste de savoir utiliser précisément Parsec.

- **Inconvénients**

- Son apprentissage peut s'avérer être très difficile.
- Indisponibilité de nouveaux protocoles.
- GloMoSim soutient actuellement des protocoles pour un réseau purement sans fil. À l'avenir les développeurs prévoient d'ajouter la fonctionnalité pour simuler les réseaux câblés et les réseaux hybrides.
- GloMoSim est limité aux réseaux IP en raison du niveau bas de conception. Par conséquent, il souffre des mêmes problèmes que Ns-2, les formats de paquets, les modèles d'énergie et Les protocoles MAC ne sont pas représentatifs à ceux utilisés dans les RCSFs.

3.3.6 Le simulateur Prowler

Prowler est un simulateur de réseaux sans fil conçu pour fonctionner sous l'environnement Matlab. C'est un simulateur, écrit à l'origine pour simuler des grains de Berkeley MICA , et il est extensible également pour des plates-formes plus générales. Prowler est implémenté et mis en application sous le langage de Matlab (m-File) ce qui rend le code de simulation direct, par exemple protocole de routage. Les avantages gagnés de l'environnement de Matlab sont le prototypage facile des applications, l'intégration des différents algorithmes d'optimisation, une interface graphique et une capacité de visualisation [25].

Le simulateur à un mode déterministe qui peut être testé par exemple pour les codes d'application et un mode probabiliste pour des simulations bas-niveau. L'échelle proowler est conçue pour simuler un nombre arbitraire des nœuds capteur avec tout type d'application, il s'adapte aussi au changement dynamique de la topologie du réseau. Prowler est capable de simuler la transmission par radio, la propagation, la réception comprenant des collisions dans les réseaux de radio ad hoc et l'opération de la couche MAC. Les modèles par radio sont basés sur des calculs de force du signal spécifiques combinés avec les erreurs aléatoires [25].

- **Avantages**

- Grace au plug-in, proowler a une bonne extensibilité .
- Il peut être utilisé pour analyser l'énergie des protocoles de routage dans les RCSFs, le taux de livraison et l'analyse du retard du paquet.

- **Inconvénients**

- Seul un guide utilisateur est disponible sur le simulateur Prowler, par contre la documentation est actuellement indisponible .
- Prowler ne fournit pas plusieurs modèles de propagation radioélectrique, seulement deux ont été mis en application.
- Aucune modélisation détaillée d'antenne n'est inclus dans les paquets de Prowler.
- Prowler ne prend pas en compte la modélisation de l'énergie des nœuds capteur, et a besoin d'une extension pour cela.

3.3.7 Le simulateur TIKTAK

Le simulateur TikTak peut simuler avec précision un nœud de matériel, et l'exécution se fait par l'interprétation de tout le code du processeur embarqué (code d'utilisateur et protocole de communication), au niveau du cycle précis. Plusieurs nœuds peuvent être émulés à ce niveau alors qu'ils interagissent les uns et les autres par la présence d'un cadre de communication qui émule la couche physique du réseau, y compris l'atténuation du signal et les interférences / collisions entre les nœuds. En même temps, cet émulateur peut émuler un nœud à un niveau supérieur d'abstraction, reposant sur la même pile de protocoles, qui est dans ce cas compilé et exécuté nativement sur la machine hôte (nous les appellerons les nœuds natifs) et qui gère des centaines de fois plus rapidement que celui qu'on a interprété. De cette façon, un système complexe peut être émulé complètement on se fondant sur la précision de l'émulateur matériel pour un nombre limité de nœuds et de la vitesse des nœuds natifs. La partie centrale du simulateur est un cadre de communication comme indiqué dans la figure ci-dessous qui agit en tant que serveur d'interconnexion (nous l'appellerons le PHY serveur).

Sa principale fonction c'est qu'il est le support de communication de données entre les nœuds par le biais de connexions TCP / IP, simulant la couche physique du RCSF. Le PHY-serveur est un serveur TCP / IP qui écoute les paquets en provenance des nœuds.

Chaque nœud (matériel émulé et nœuds natifs) crée une liaison TCP / IP avec PHY-serveur dans le cadre de ses routines d'initialisation, en utilisant la connexion pour la communication au serveur central durant toute la simulation. Enfin, l'environnement de simulation interagit avec l'utilisateur via une interface graphique. L'application de l'interface graphique, qui se connecte directement au PHY-serveur, est utilisée pour configurer la structure du RCSFs et les propriétés de chaque nœud [25].

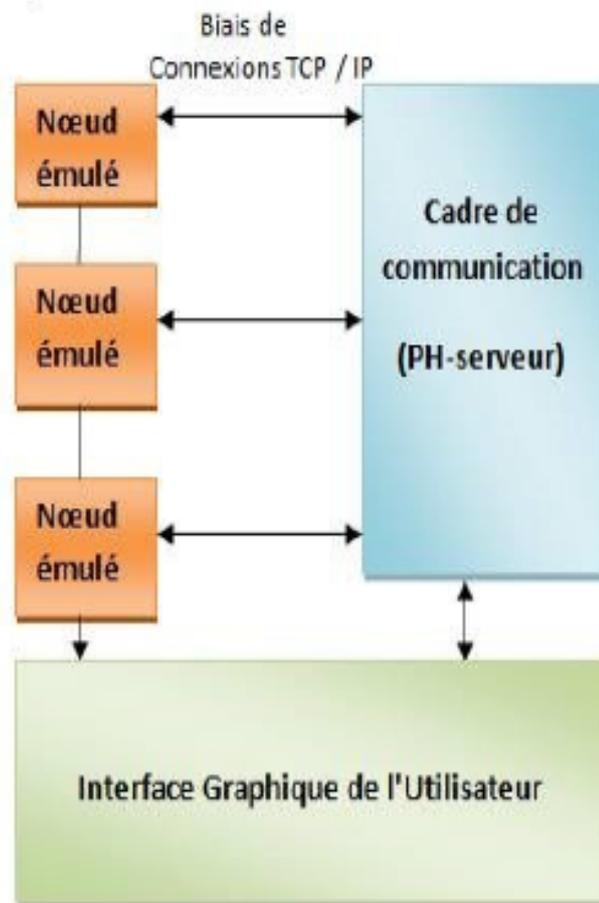


FIGURE 3.2 – Schéma fonctionnel du simulateur TIKTAK

- **Avantages**

La principale caractéristique de ce simulateur est la capacité de simuler le programme et la pile de latence, en raison de l'émulation des nœuds bas niveau du matériel, et de permettre le test et le débogage des codes intégrés comme dans la demande finale. Au même temps, l'émulation au niveau du protocole permet d'augmenter la vitesse de simulation lorsque la précision temporelle est moins stricte.

3.3.8 Le simulateur SENS

SENS [24] est un simulateur à base de composants personnalisable pour les applications de WSN. Il se compose d'éléments interchangeable et extensibles pour les applications, la communication réseau, et l'environnement physique. Dans SENS, chaque nœud est divisé en quatre composantes principales :

- **Application** : simule l'application logicielle du nœud de détection.
- **Network** : traite les paquets entrants et sortants.
- **Physique** : lit les informations détectées.
- **Environnement** : c'est les caractéristiques de propagation du réseau.

SENS définit trois modèles de réseau qui peuvent être utilisés. Le premier transmet des paquets avec succès à tous les voisins, le second livre avec un risque de perte basé sur une probabilité fixe et le troisième considère le risque de collision au niveau de chaque nœud. La composante physique comprend le matériel non-réseau pour le capteur comme le pouvoir, capteurs et actionneurs. A un niveau inférieur, le composant de l'environnement modélise les phénomènes physiques et la mise en page. Le modèle de mise en page comprend différents types de surfaces, chaque radio affectant et la propagation du son d'une manière différente.

- **Avantages**

- Les utilisateurs peuvent choisir entre différents environnements spécifiques à l'application avec des caractéristiques différentes de propagation du signal.
- Le code source de SENS peut être porté directement dans les nœuds de capteurs réels, ce qui permet la portabilité des applications.
- Elle fournit un module de puissance pour le développement fiable des applications.

- **Inconvénients**

- SENS est moins personnalisable que beaucoup d'autres simulateurs, ne fourni aucune chance de modifier le protocole MAC, ainsi que d'autres protocoles de réseau de bas niveau.
- SENS utilise l'un des modèles environnementaux les plus sophistiqués et met en œuvre une bonne utilisation des capteurs. Cependant, le seul phénomène mesurable c'est le son.

3.4 Tableau comparatif

Simulateurs	NS-2	Omnet++	J-Sim	Tossim	Prowler	Glomosim	Sens	Tiktak
Architecture	Orienté Objet	Modules	Orienté Objet	Modules	Modules	---	Modules	Modules
Mobilité	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Parallélisme	Non	MPI/PVM	RMI	Non		SMP		Oui
Modèle d'énergie	---	Oui	Oui	---	Oui	---	---	---
Modèle radio	Oui	Oui	---	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Passage à l'échelle	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Interface	C++/OTCL	C++	Java	C++ / python	Matlab	Parsec (C)	C++	C/C++
Licence	Gratuit	Gratuit pour les universitaires et pour toute utilisation non lucrative	Gratuit	Gratuit	Gratuit	Gratuit pour les universitaires	Gratuit	Gratuit
Plate-forme	Windows Unix (Linux, Solaris)	Windows (Cygwin) Unix	Java	Windows (Cygwin) Unix	Windows, Linux	Windows, Linux, Mac	Windows, Linux	Linux

FIGURE 3.3 – Tableau comparatif

3.5 Conclusion

Plusieurs simulateurs pour les réseaux sans fil existent et présentent différents modèles et caractéristiques. Le choix d'un simulateur doit être dicté par les exigences des protocoles. Comme les simulateurs permettent de traiter les réseaux en totalité, il est bien pratique de les utiliser surtout qu'ils rendent leur surveillance plus facile. En outre, comme les expérimentations sont décrites comme des scénarios de fichiers, ces derniers sont évidemment reproductibles. Le choix du simulateur est donc une question délicate, et la réponse dépend en grande partie sur le besoin d'utilisation. Les simulateurs doivent présenter plusieurs propriétés pour l'amélioration de leur précision, leur rapidité, leur sociabilité, leur facilité d'utilisation.

RÉALISATION DU SIMULATEUR ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

4.1 Introduction

Le routage hiérarchique est considéré comme étant l'approche la plus favorable en terme d'efficacité énergétique. LEACH est considéré comme étant le premier protocole de routage hiérarchique basé sur la seconde approche.

Dans ce chapitre, nous expliquerons les étapes de réalisation du simulateur, l'interface graphique de simulation et fonctionnement de protocole LEACH. Dans le cadre de ce projet, nous réaliserons une simulation du protocole de routage LEACH sur JAVA.

4.2 Choix de Java

JAVA a été développé par Sun au début des années 90 dans une filiation avec le langage C et surtout le langage objet C++ mais dans une optique de plus grande portabilité d'une machine à une autre et d'une plus grande fiabilité. Les programmes JAVA sont compilés en "bytecode", un langage intermédiaire indépendant de la plateforme. Dans notre implémentation, nous avons choisi JAVA car il permet la création des interfaces graphiques grâce à sa librairie Swing et aussi parce que c'est le seul langage dont le code exécutable est portable [25].

JAVA est un langage général, évolué et orienté objet et qui reprend en grande partie la syntaxe du langage C++. Il possède les avantages suivants :

- Robustesse : le langage fournit des structures facilitant l'élimination des bugs.
- Portabilité : un processus java s'exécute dans un environnement virtuel le rendant indépendant de spécificités effectives.
- Dynamicité : un programme java peut facilement s'enrichir sans avoir besoin d'être arrêté.

4.3 Les étapes de réalisation du simulateur

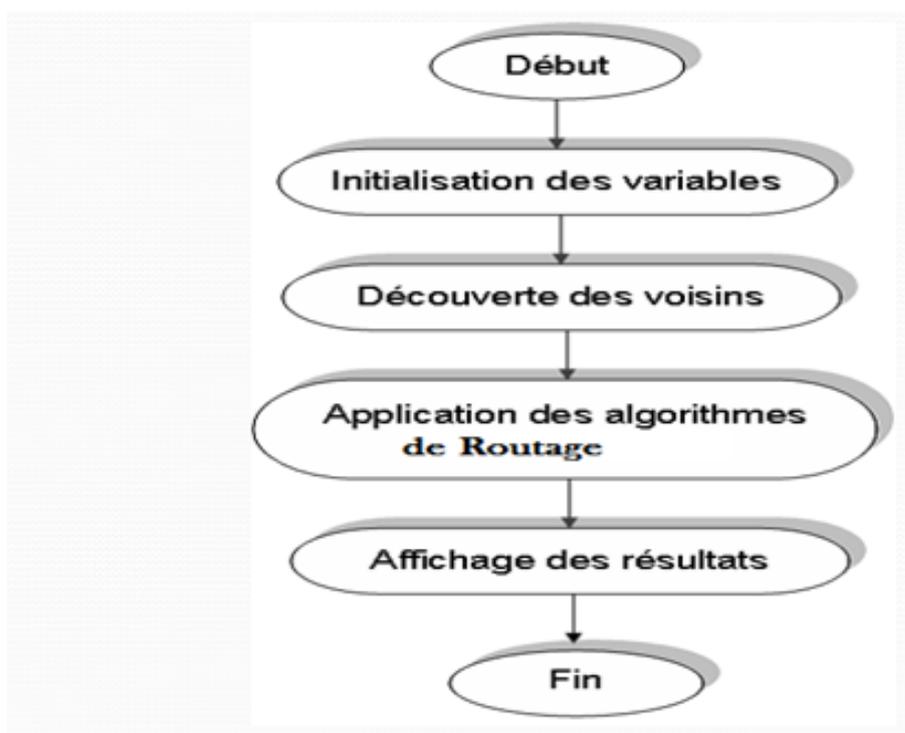


FIGURE 4.1 – les principales fonctions du simulateur

- **Initialisation des variables** : cette étape correspond à la déclaration des variables globales (nombre de capteurs, surface du terrain simulé, nombre de tests et d'exécutions à réaliser ...), leur initialisation, la création des capteurs (portée de transmission, capacité énergétique, capacité mémorielle, capacité calculatoire des capteurs) et leur déploiement aléatoire sur le terrain simulé.
- **Découverte des voisins** : la découverte des voisins est exécutée automatiquement au lancement de l'application. La découverte des voisins se fait par diffusion. Chaque capteur se trouvant à une distance inférieure ou égale à la portée de transmission d'un autre capteur est sensé recevoir les messages diffusés par ce dernier et est, de ce fait, considéré comme son voisin.
- **Application des algorithmes de regroupement** : durant la phase précédente, une détermination des voisins de chaque capteur a été réalisée. A partir d'une connaissance du voisinage direct de chaque capteur (seule condition pour appliquer les algorithmes de regroupements)

et des différents messages circulant dans le réseau (vecteur de données, note, . . .), une décomposition du réseau en clusters sera réalisée par exécution des différentes étapes d'algorithme de LEACH.

- **Affichage des résultats** : les courbes obtenues (résultats de la phase précédente) serviront à comparer les protocoles de implémentés selon les critères d'évaluation de performances choisis (La surface du réseau ($m*m$), Localisation de la station de base, Nombre de nœuds L'énergie initiale des nœuds, Etrans (énergie consommée durant transmission), Erecep (énergie consommée durant la, Distance entre deux capteurs, Taille d'un message).

4.4 Les interface graphique du simulation

La première fenêtre de la simulation

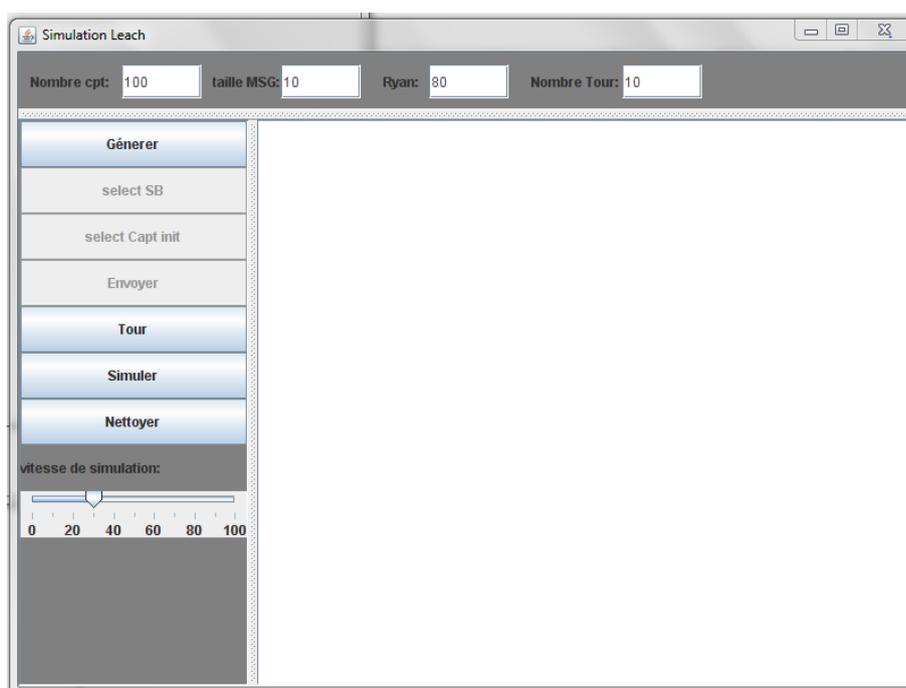


FIGURE 4.2 – l'interface graphique du simulation.

Si on clique sur générer +select SB+ select capt init en aura l'interface suivant :

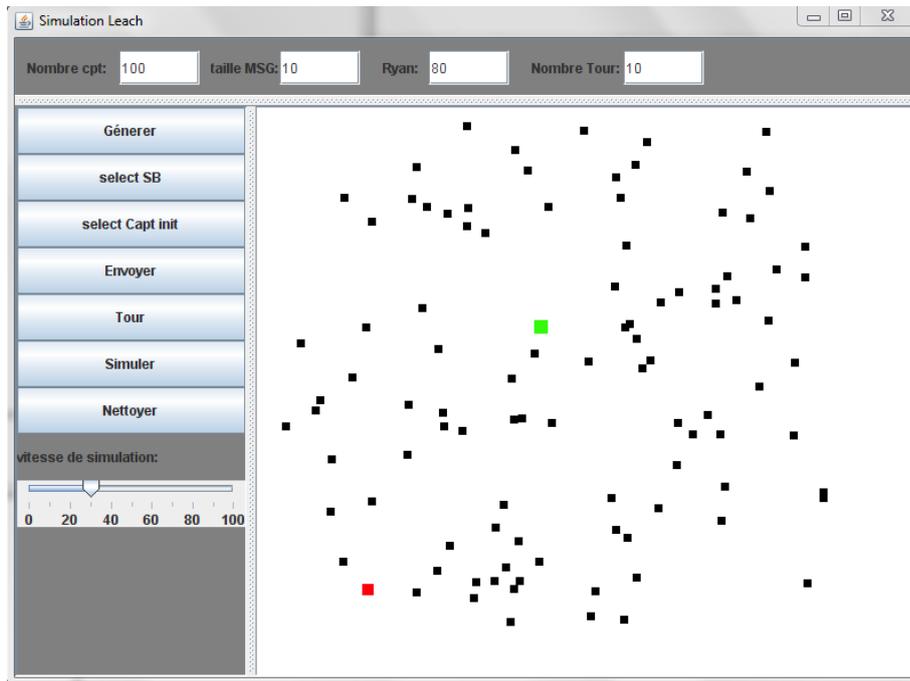


FIGURE 4.3 – deployment du réseau.

L'interface de routage de données sélectionner des chemins dans un réseau pour transmettre des messages depuis un capteur initial jusqu'à une station de base.

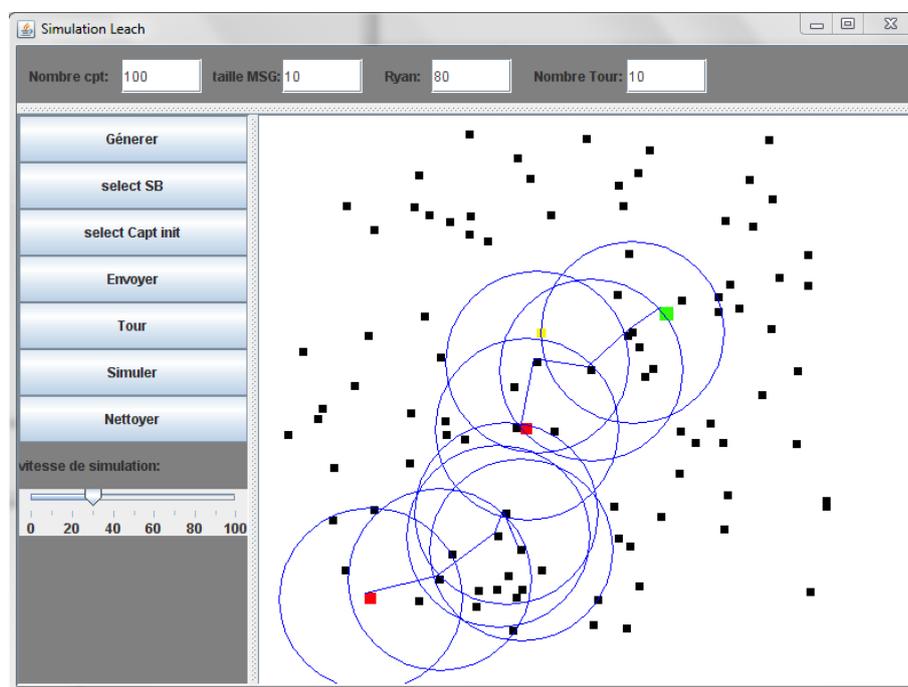


FIGURE 4.4 – Routage de données.

4.4.1 Principe de fonctionnement du protocole Leach

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est un protocole de routage hiérarchique employant un procédé de regroupement qui divise le réseau en deux niveaux : cluster-heads et les nœuds. Le protocole se déroule en rounds. LEACH arrange les nœuds dans le réseau en petits groupes et choisit l'un d'entre eux comme cluster-head. Le nœud détecte sa cible et envoie ensuite les informations pertinentes à son cluster-head. Ensuite, le cluster-head comprime les informations reçues de tous les nœuds et les envoie à la station de base. Les nœuds sélectionnés en tant que cluster-head drainent plus d'énergie par rapport aux autres nœuds, comme il est nécessaire d'envoyer des données à la station de base qui peut être situé loin. Ainsi LEACH utilise la rotation aléatoire des nœuds nécessaires aux cluster-heads pour répartir uniformément la consommation d'énergie dans le réseau.

Les opérations LEACH peuvent être divisées en deux phases :

Phase de construction :

Le but de cette phase est la construction des clusters en choisissant les chefs et en établissant la politique d'accès au média au sein de chaque groupe. Cette phase commence par la prise de

décision locale pour devenir cluster-head. Chaque nœud n choisit un nombre aléatoire, si ce nombre est inférieur

La phase de communication :

est responsable de la transmission des données captés. Les deux phases doivent être exécutées en même temps par les nœuds du réseau afin de garantir un meilleur fonctionnement du protocole. à une valeur $T(n)$, le nœud devient cluster-head. $T(n)$ est défini comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

- P : pourcentage désiré de cluster-heads pendant un round.
- r : numéro du round.
- G : l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été élu cluster-heads pendant les $1/P$ rounds précédents.

4.5 Simulation et discussion de résultats

4.5.1 Les paramètres de simulation

Le tableau 4.1 regroupe les différents paramètres utilisés dans la simulation.

Paramètre	Valeur
La surface du réseau (m*m)	(100*100)
Localisation de la station de base	(280,0)
Nombre de nœuds	33
L'énergie initiale des nœuds	100 joules
Etrans (énergie consommée durant transmission)	5 j
Erecep (énergie consommée durant la transmission)	2 j
Distance entre deux capteurs	/
Taille d'un message	256 bit

TABLE 4.1 – Les paramètres de la simulation.

4.5.2 Métriques d'évaluation de performances

Afin de montrer l'efficacité de notre solution, nous avons considéré les métriques suivantes :

- **Energie moyenne restante** : représente la quantité d'énergie restante de chaque nœud dans le réseau, elle est exprimée par la différence entre l'énergie initiale et l'énergie consommée par un capteur. L'énergie d'un capteur est mise à jour par l'affectation suivante [27] : $E_g = E_i$

$$= E_i$$

$$E_{\text{cons}} = E_{\text{trans}} + E_{\text{recep}}$$

$$E_{\text{rest}} = E_i - E_{\text{cons}}$$

E_g : l'énergie globale.

E_i : l'énergie initiale.

E_{cons} : l'énergie consommée.

E_{trans} : l'énergie de transmission.

E_{recep} : l'énergie de réception.

E_{rest} : l'énergie moyenne restante

- **La durée de vie** : C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où le premier nœud épuise toute son énergie.

4.5.3 Résultats de simulation

- Les résultats de simulation sont enregistré dans un fichier Excel.
- Les courbes obtenues serviront à comparer les protocoles de implémentés selon les métriques d'évaluation de performances choisis.

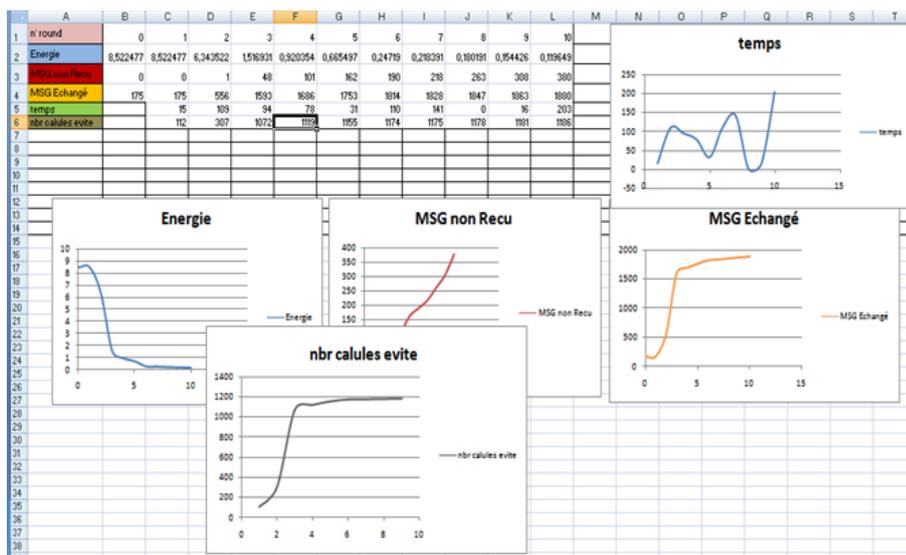


FIGURE 4.5 – L’interface de fichier Excel.

4.5.4 Discussion des résultats

L’exécution de la simulation a généré une listes de graphes qui traite le changement d’ énergie moyenne, nombre de messages bien reçu, nombres de messages produits... par rapport au numéro de round qui incrémente a chaque nouveau tour.

4.5.5 les résultats de LEACH

L'énergie

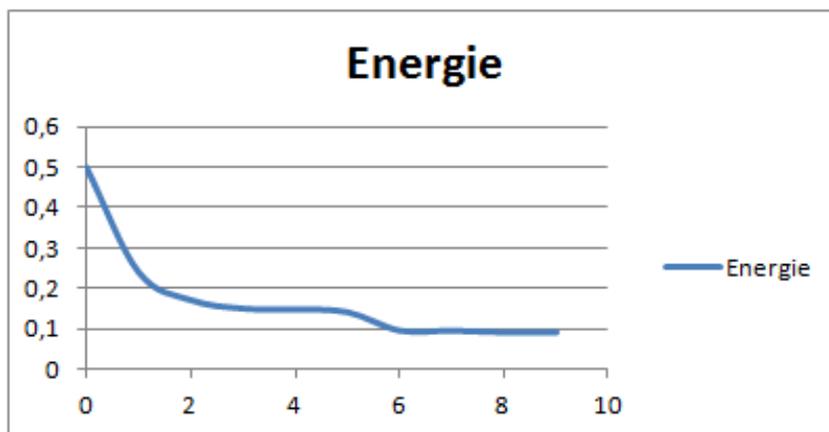


FIGURE 4.6 – graphe d'énergie obtenue.

Le graphe obtenu montre que la moyenne énergétique de notre réseau qui est composé de 100 capteurs disposé aléatoirement.

Quand le nombre de tour augmente cette moyenne tend vers 0. Cela revienne au fait que durant un tour il ya des échanges de messages entre les capteurs, alors la réception et l'envoi des messages consomme de l'énergie de capteur actif.

Nombre de message non reçue

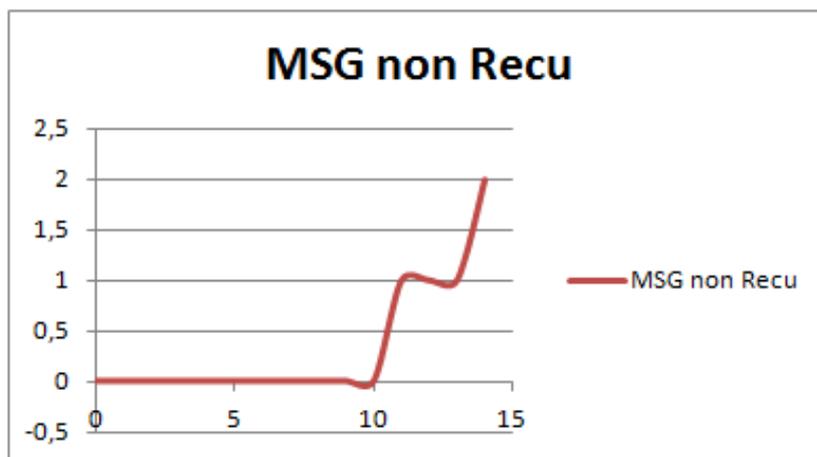


FIGURE 4.7 – nombre de message non reçu durant la simulation.

Avec ce graphe on veut surveille le bon déroulement de la simulation, on peut déduire le nombre des messages non reçu apartir la relation :

$\text{Nb messages non reçu} = \text{nb messages produits} - \text{nb messages bien reçu}$.

Selon le graphe ce nombre augment avec le nombre de tour faites. A partir de la on peut confirmer notre intuition qui est basé sur le fait : s'il ya un manque dans l'énergie alors l'échanges des messages ne peut pas être fait.

4.5.6 Amélioration de LEACH

Après l'exécution consécutive de la simulation on a remarqué que le capteur de message initial (producteur de message) doit chercher son voisin le plus proche a la station de base, une fois que ce dernier est trouvé lui-même doit appliquer le même principe (chercher le voisin le plus proche a la station de base et cela par le calcul des distance entre les nœuds).

L'amélioration de ce principe consiste à sauvegarder le voisin le plus proche à la station de base des que ce dernier est trouvé. L'intérêt de cette amélioration est d'éviter de faire des calculs déjà exécuté.

Pour atteindre ce but on doit modifier l'architecture de chaque nœuds on ajoutant une mémoire qui stocks des couples (id-voisin-proche, id-station de base) .alors le nœud qui produit le message la première fois vérifier si il existe dans ca mémoire un couple (X, id-station de base actuelle) si c'est vrai alors il envoi le message a X qui est le voisin plus proche a SB déjà calculé. Sinon le

nœud va chercher le voisin le proche a SB avec les calculs des distances, une fois que ce dernier est trouvé on va ajouter a la mémoire de nœuds le couple (id voisin proche calculé, id station base actuelle) .

1- Nombre de calcule évité :

Le but de ce graphe est de montrer l'avantage de l'amélioration apporté a l'algorithme de LEACH.

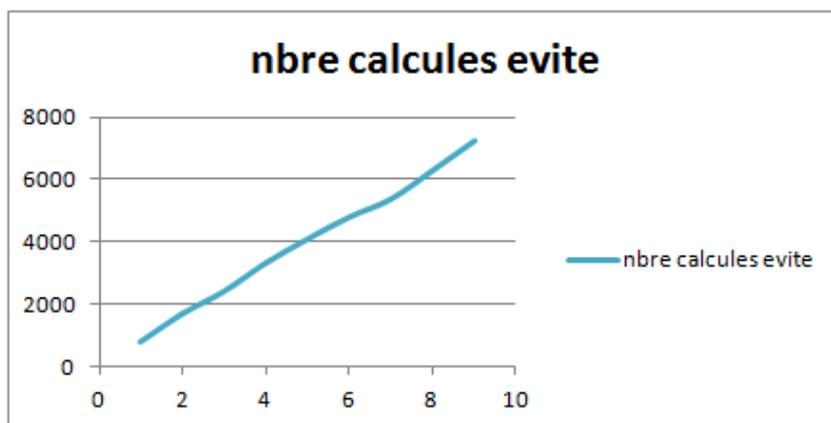


FIGURE 4.8 – nombre de calcules(temps) gagné

Dans les premières transmissions aucun des nœuds a déjà calculé le voisin le plus proche a la station de base, ce qui justifié la valeur qui est proche de 0 de nombre de calcule évité, mais avec le temps on remarque que ce nombre augmente .car la plus part des nœuds ont déjà calculé leur voisin proche a la station de base.

Avec le graphe on peut dire que ce nombre n'est pas négligeable, dans la réalité ce nombre va influencer sur le temps d'exécution de la transmission.

L'inconvénient de cette amélioration est : Pour réaliser cet algorithme il faut modifier l'architecture de chaque nœud on ajoutant une mémoire.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le protocole de routage hiérarchique LEACH , nous avons proposées une amélioration a ce protocole dans le but de sauvegarder le voisin le plus proche à la station de base . L'intérêt de cette amélioration est d'éviter de faire des calculs déjà exécuté.

D'après les résultats de la simulation on arrive a modifier l'architecture de chaque nœuds on ajoutant une mémoire qui stocks des couples (id-voisin-proche, id-station de base) .

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de dispositifs de communication ultra petits, autonomes avec des ressources de calcul et d'énergie limitées. Ils sont actuellement considérés comme l'une des technologies qui bouleverse notre façon de vivre, grâce à leur utilisation dans différents domaines d'application.

L'utilisation des batteries par les capteurs est une contrainte critique dans les réseaux de capteurs. La deuxième contrainte est environnementale : les capteurs sont parfois déployés sans surveillance et en grand nombre, de sorte qu'il est difficile de changer ou de recharger leurs batteries. Pour cela, les algorithmes et les protocoles de routage pour les réseaux de capteurs doivent minimiser la consommation d'énergie.

En effet, plusieurs protocoles de routage ont été proposés dans la littérature afin d'améliorer les performances des RCSFs et de répondre aux besoins des applications considérées. En outre, plusieurs classifications de ces protocoles ont été proposées. Dans ce contexte plusieurs outils de simulation ont été développés pour évaluer les performances de ses nouveaux protocoles.

Nous nous sommes intéressés dans ce mémoire à la simulation des RCSFs. Notre objectif étant de déterminer le simulateur le mieux adapté aux RCSFs. Pour cela, nous avons d'abord présenté un état de l'art détaillé sur les réseaux de capteurs sans fil où nous avons étudié plusieurs aspects liés à ses réseaux, ce qui nous a permis de relever les principales caractéristiques et contraintes des RCSFs. Par la suite, nous avons présenté la problématique du routage dans les RCSFs. En passant en revue la classification des approches de routages dans les RCSFs. Nous avons également dressé un état de l'art des différents outils de simulation des RCSFs tout en se focalisant sur les avantages et inconvénients de chacun d'eux. Enfin, nous avons conçu un nouveau simulateur en langage JAVA. Par ailleurs, afin de voir de plus près le fonctionnement de ce simulateur, nous avons implémenté le protocole LEACH et une nouvelle version améliorée de LEACH dans ce dernier. Nous n'avons constaté que notre amélioration donne de meilleurs résultats, en termes d'énergie moyenne consommée et de nombre de message bien reçu.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : A. Salima épouse BRAHAMI Evaluation du Protocole Directed Diffusion dans un réseau de capteurs sans fil mémoire master en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid- Tlemcen , Année : 2013-2014 .
- [2] : A.CHOUHA.Traitement et transfert d'image par reseau de capteur sans fil. .memoire de magistere en informatique, Université Hadj Lakhdar -Batna ,Algerie ,2011.
- [3] : F.Z BEVHAMIDA.Tolerance aux pannes dans les reseaux de capteur sans fil.memoire de magistere en ingenierie des systemes informatique,Ecole Nationale superieure en informatique, Alger,Algerie,2009.
- [4] :S. Abbes,"Implémentation d'une application orientée surveillance pour les réseaux de capteurs", Université Abou Bakr Belkaid- Tlemcen Faculté des Sciences Département d'Informatique, 2011 /2012.
- [5] : A. Abdelhalim, B. Mohammed Conception d'un algorithme de routage basé sur l'heuristique du recuit simulé pour les réseaux de capteurs à grande échelle , Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique ,Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen,2012-2013.
- [6] :I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. " Wireless sensor Networks : a survey ", article .BWNL, SECE, GIT, Atlanta, USA, 20 December 2001.
- [7] : Y.CHALLAL. " Réseaux de capteurs sans fil ", cours Université de Technologie de Compiègne, France, 2008.
- [8] :F.Z . Benhamida, " La tolérance aux pannes dans les réseaux de capteurs sans fil ", Rapport du mini projet, Institut National de Formation en Informatique INI, Algérie, 2006/2007.
- [9] : L. Khelladi, N. Badache " Les réseaux de capteurs : état de l'art ", Rapport de recherche, Algérie, Février 2004.
- [10] : H. Hadjammar, N. Doufene, " Routage dans les réseaux de capteurs : optimisation du protocole Directed Diffusion", Projet de fin d'étude, Institut National de formation en Informatique INI, Algérie, 2006.

-
- [11] : E. Dhib, " Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de capteurs ", Projet fin d'étude ingénierie de réseaux, Ecole Supérieure des Communications de Tunis, 2007.
- [12] : Y. Khalfaoui, "Routage dans les réseaux de capteur sans fils", Projet de fin d'étude, Centre universitaire Mustapha Stambouli, Mascara, 2006.
- [13] : Y. Romdhane, " Evaluation des performances des protocoles S-MAC et Directed Diffusion dans les réseaux de capteurs ", Projet de fin d'études, Ecole Supérieure des Communications de Tunis (Sup'Com), 2006 / 2007.
- [14] : S. belkheyr, Etude d'un protocole de routage basé sur les colonies de Fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil, Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique ,Université Abou Bakr Belkaid- Tlemcen,2012-2013.
- [15] :R. MOHAMED, Problèmes de sécurité dans les Réseaux de capteurs avec prise en charge de l'énergie , mémoire de magister, université de saad dahlab de Blida,Novembre 2013.
- [16] : I. Mahgoub, M. Ilyas, " Sensor Network Protocol ", Hardcover Book,ISBN : 0849370361, Number of pages : 248, USA, 27 Janvier 2006.
- [17] A. Bouabdallah, H. Betthahar, Y. Challal, " Les Réseaux de capteurs(WSN : Wireless Sensor Networks) ", Cours, Université de Technologie de Compiègne, France, 2008.
- [18] :S. Fdida et G. Hébuterne. " Méthodes exactes d'analyse de performance des réseaux ". Lavoisier Ed, Paris, 2004.
- [19] :G.Fleury,P.Lacomme, and A.Tanguy. Simulation à événements discrets, chapitre1, page pp.66.2006.
- [20] : L. Li and J.Y.Halpern, Minimum-Energy Mobile Wireless Networks Revisited, in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '01), Helsinki, Finland, June 2001.
- [21] :H. Hadjammar, N. Doufene, " Routage dans les réseaux de capteurs :optimisation du protocole Directed Diffusion", Projet de fin d'étude, Institut National de formation en Informatique INI, Algérie, 2006.
- [22] :S. ,Ehsan , Bechir ,Hamdaoui" A Survey on Energy-Efficient Routing Techniques with QoS Assurances for Wireless Multimedia Sensor Networks" IEEE COMMUNICATIONS 2012.
- [23] :M. Patil, Rajashekhar C. Biradar" A Survey on Routing Protocols in Wireless Sensor Networks" Bangalore-560 064, India,IEEE 2012.
- [24] :B. KARIMA, Les simulateurs réseaux Technologie réseau. PhD thesis, Université de Bejaia Faculté des Sciences et Techniques, 2013/2014.
- [25] :D. M , Développons en java .livre, 2013
- [26] :L.Ding "The Improvement of LEACH Protocol in WSN",College of science,Huazhong Agricultural University Wuhan,China,20 II International Conference on Computer Science and Network Technology.
-

- [27] :C. Y.XU,J.Heidemann,and D.Estrin "Geographiy-informed energy conservation for ad-hoc routing", Proceedings of thee 7 Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking(MobiCom'01),Rome,Italy,pp.70-84,July 2001.
- [28] :K. Rahim, "Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fils", ThéSSse de Doctorat Réseaux et Télécommunications, Institut National Polytechnique de Toulouse, Le 28 Septembre 2009.