

N° d'ordre : 3135

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Structure de Recherche : Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications

Discipline : Sciences de l'ingénieur

Spécialité : Informatique et Télécommunications

Présentée et soutenue le : 29/09/2018 par :

Saleh BOUARAFA

Réduction de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

JURY

M. Rachid OULAD HAJ THAMI	PES, ENSIAS, Rabat, Maroc	<i>Rabat</i>	<i>Président</i>
M. My Driss RAHMANI	PES, FS, Rabat, Maroc		<i>Directeur de thèse</i>
M. Hicham LAANAYA	PH, FS, Rabat, Maroc		<i>Rapporteur</i>
M. Samir MBARKI	PES, FS, Kénitra, Maroc		<i>Rapporteur</i>
M. Zytoune OUADOUDI	PH, ENCG de Kénitra, Maroc.		<i>Examineur</i>
M. Rachid SAADANE	PH, EHTP, Casablanca, Maroc		<i>Co-encadrant</i>

Année Universitaire : 2017/2018



AVANT-PROPOS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications LRIT, de la Faculté des Sciences de Rabat, sous la direction de Monsieur **Moulay Driss RAHMANI** et l'encadrement de Monsieur **Rachid SAADANE**.

C'est avec la plus profonde gratitude que je souhaite remercier vivement mon directeur de thèse Monsieur **Moulay Driss RAHMANI**, Professeur d'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour ces années de soutien, pour ses précieux conseils scientifiques et humains, ainsi que pour ses encouragements.

Au défunt le professeur **Driss ABOUTAJDINE**, qui était le directeur du laboratoire LRIT et le directeur du Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST), j'implore Le Tout-Puissant d'accorder à sa famille, à ses proches, et à ses amis, la patience et le réconfort, et de lui entourer de Sa miséricorde et de Sa clémence.

J'aimerais lui exprimer ma profonde gratitude, également à Monsieur **Mohamed OUADOU**, actuel directeur du laboratoire LRIT, de m'avoir accepté au sein du laboratoire LRIT et d'avoir accepté de m'offrir l'opportunité d'effectuer ces travaux de recherche dans un contexte très favorable.

Merci aussi à mon encadrant Monsieur **Rachid SAADANE**, Professeur habilité à l'École Hasania des Travaux Publics de Casablanca (EHTP). Je tiens à le remercier pour ces années de soutien, pour la qualité et la complémentarité de son encadrement, pour ses précieux conseils scientifiques et pour son aide et sa capacité à simplifier les problèmes rencontrés dans le cadre du travail. Je le remercie infiniment pour sa compréhension dans toutes les circonstances et pour son habilité de toujours trouver les mots d'encouragement, qui ne manquaient pas d'augmenter ma motivation.

Je tiens également à exprimer mes très sincères remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer mes travaux de thèse.

Je tiens à remercier vivement Monsieur **Rachid OULAD HAJ THAMI**, Professeur d'enseignement supérieur à l'École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes (ENSIAS), d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse.

Mes remerciements vont à Monsieur **Hicham LAANAYA**, Professeur habilité à la Faculté des Sciences de Rabat (FSR), pour avoir accepté de rapporter ce travail et de participer au jury.

Je tiens également à remercier Monsieur **Samir MBARKI**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences de Kénitra (FSK), d'avoir accepté de rapporter mes travaux de thèse et de participer au jury.

Merci infiniment à Monsieur **Zytoune OUADOUDI**, Professeur habilité à l'École Nationale des Sciences appliquées de Kénitra (ENSA), pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury.

Mes remerciements s'adressent également à toute ma famille. Merci à mes parents pour leur confiance inconditionnelle, pour leur soutien de tous les instants et pour leurs encouragements. Merci enfin à tous les membres de ma famille pour leur soutien et pour leur affection.

Je tiens également à associer à ces remerciements l'ensemble de ma grande famille et de mes amis et collègues pour m'avoir soutenu pendant tout ce temps, s'ils ne peuvent pas être tous cités ici, ils se reconnaîtront.



RÉSUMÉ

La miniaturisation progressive des composants électroniques et le développement rapide dans le domaine informatique et télécommunication et surtout dans les réseaux sans fil ont mené à l'apparition des composantes appelées capteurs. Ces composantes, utilisées pour collecter les données déterminées d'une zone (p. ex., la température, la lumière, le bruit, l'humidité, etc.), constituent un réseau de capteurs sans fil. Ces mesures de capteurs sont transmises à travers une transmission radio vers un noeud central appelé Station de Base qui constitue la passerelle vers une application-utilisateur dédiée qui prend des décisions basées sur ces lectures de capteurs. Ce type de réseau a subi actuellement un développement considérable dans plusieurs domaines d'application (sécurité, santé, environnement, sécurité alimentaire, fabrication, télécommunication, robotique, etc.). Néanmoins, il souffre de limitations des ressources énergétiques. Le déploiement de ces réseaux est souvent dans des régions hostiles où le changement de batteries, qui alimentent les capteurs, est impossible, nous avons constaté que la grande partie d'énergie consommée par le capteur est durant la transmission de données. Donc le principal défi de cette thèse est de proposer des algorithmes de routage et/ou optimiser les protocoles de routage pour augmenter la durée de vie de RCSF.

À cet égard, nous avons proposé en premier lieu, un algorithme de routage basé sur le théorème de Pythagore généralisé permettant à chaque noeud de faire une meilleure sélection (en matière de coût énergétique) de son noeud suivant pour le saut suivant parmi ses voisins.

En deuxième lieu, nous avons proposé et évalué trois méthodes de transmission appelées : S-Rhombus, S-Square, S-Circle pour établir un routage réaliste basé sur une topologie spécifique de réseaux de capteurs sans fil homogènes.

En troisième lieu, nous avons proposé un nouvel algorithme de routage intelligent de réseaux de capteurs sans fil, constitué de noeuds stables dispersés de façon aléatoire, cette approche est inspirée de colonies de fourmis. L'algorithme proposé prend en compte la distance entre deux noeuds, la longueur de chemin choisie et l'énergie résiduelle des noeuds de façon à mettre à jour la probabilité de choix du noeud suivant parmi ces noeuds voisins, contrairement à plusieurs algorithmes de routage; d'une part, les noeuds regroupent les données de leurs prédécesseurs et les envoient tous à leurs successeurs; d'autre part, la source est presque toujours changée à chaque itération. D'où, la consommation d'énergie est équilibrée entre les noeuds. De sorte que, la durée de vie du réseau sera augmentée. Les conséquences des simulations sur les répliques prouvent le succès de notre futur algorithme de routage (SRA).

Mots clés : *Algorithme de routage intelligent (SRA); colonie de fourmis; consommation d'énergie; déploiement; énergie; énergie résiduelle; méthode S-Rhombus; méthode S-Square; méthode S-Circle; réseau de capteurs sans fil; théorème de Pythagore généralisé; topologie; WSN.*



ABSTRACT

The gradual miniaturization of electronic components and the rapid development in the IT and telecommunication field and especially in wireless networks led to the appearance of components called sensors. These components used to collect determined area data (e.g., temperature, light, noise, humidity, etc.), constitute a wireless sensor network. These sensor measurements are transmitted through a radio transmission to a central node called Base Station, which forms the gateway to a dedicated user application that makes decisions based on these sensor readings. This type of network is currently undergoing considerable development in several fields of application (safety, health, environment, food safety, manufacturing, telecommunications, robotics, etc.). Nevertheless, it suffers from limitations of energy resources. The deployment of these networks has been often in hostile areas where the change of batteries that power the sensors is impossible, we found that much of the energy consumed by the sensor is during data transmission. So the main challenge of this thesis is to propose routing algorithms and/or optimize routing protocols to increase the life of RCSF.

In this regard, we first proposed a routing algorithm based on the generalized Pythagoras theorem allowing each node to make a better selection (in terms of energy cost) of its next node for the next hop among its neighbors.

In the second place, we proposed and evaluated three transmission methods called S-Rhombus, S-Square, S-Circle to establish a realistic routing based on a specific topology of homogeneous wireless sensor networks.

In the third place, we proposed a new algorithm for intelligent routing of wireless sensor networks, consisting of random nodes dispersed randomly, this approach is inspired from ant colonies. The proposed algorithm takes into account the distance between two nodes, the chosen path length and the residual energy of the nodes so as to update the probability of choice of the next node among these neighboring nodes, unlike several routing algorithms; on the one hand, the nodes are aggregating data of their predecessors and send them all to their successors; on the other hand, the source is almost always changed at each iteration. Hence, the energy consumption is balanced between the nodes. So that, the lifetime of the network will be increased. The replications' consequences of simulations prove the success of our future routing algorithm (SRA).

Keywords : *Smart routing algorithm (SRA); ant colony; energy consumption; deployment; energy; residual energy; S-Rhombus method; S-Square method; S-Circle method; wireless sensor network; Generalized Pythagorean Theorem; topology; WSN.*



TABLE DES MATIÈRES

Résumé	iii
Abstract	v
Liste des notations et abréviations	xi
Liste des figures	xv
Liste des tableaux	xvi
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Réseaux de capteurs sans fils applications et challenges	5
1.1 Introduction	6
1.2 Architecture d'un noeud capteur	6
1.3 Pile protocolaire dans un RCSF	8
1.3.1 Couche physique	9
1.3.2 Couche liaison de données	9
1.3.2.1 La sous-couche MAC	9
1.3.2.2 La sous-couche LLC	10
1.3.3 Couche réseau	10
1.3.4 Couche Transport	10
1.3.5 Couche application	10
1.3.6 Plans de gestion	11
1.4 Applications	11
1.5 Problèmes	12
1.6 Conclusion	19
Chapitre 2 : Les principaux protocoles de routage dans les RCSF	21
2.1 Introduction	22
2.2 Les principaux protocoles de routage dans les RCSF	22
2.2.1 Les Protocoles hiérarchiques	22
2.2.1.1 Le protocole de routage "LEACH"	23
2.2.1.2 Les protocoles de routage "PEGASIS Hierarchical-PEGASIS"	23
2.2.1.3 Les protocoles de routage "TEEN et APTEEN"	23
2.2.2 Les protocoles de routage basés sur la localisation	24
2.2.2.1 Le protocole de routage "MECN"	24
2.2.2.2 Le protocole de routage "GAF"	24

2.2.2.3	Le protocole de routage "GEAR "	25
2.2.3	Les protocoles de routage "data-centric"	26
2.2.3.1	Le protocole de routage "SPIN"	26
2.2.3.2	La diffusion dirigée	27
2.2.3.3	Le protocole de routage par rumeur	27
2.3	Les principaux algorithmes de conservation d'énergie	28
2.3.1	L'algorithme de routage "EARLEAHSN "	29
2.3.2	L'algorithme de routage "EARCBSN "	29
2.3.3	L'algorithme de routage "GBR "	29
2.4	Les algorithmes intelligents	30
2.4.1	Méthodes basées sur des algorithmes intelligents	30
2.4.1.1	Protocoles de routage logique flous	31
2.4.1.2	Recuit simulé basé	31
2.4.1.3	Approches basées sur l'algorithme génétique	32
2.4.1.4	Méthodes basées sur l'optimisation par essaim de particules	33
2.4.1.5	Méthodes basées sur le réseau neuronal	33
2.4.1.6	Méthodes basées sur l'apprentissage par renforcement	34
2.4.1.7	Méthodes basées sur l'optimisation des colonies de fourmis	35
2.5	Conclusion	35

Chapitre 3 : Solutions proposées pour augmenter la durée de vie des RCSFS

multi-sauts		37
3.1	Introduction	38
3.2	La topologie basée sur le théorème de Pythagore généralisé	38
3.2.1	Introduction	38
3.2.2	Topologie et wsn dans l'état de l'art	39
3.2.3	Topologie proposée	40
3.2.3.1	Formulation du problème	40
3.2.3.2	L'approche proposée	42
3.2.3.3	Validation de l'approche	43
3.2.4	Évaluation des performances	46
3.2.5	Conclusion	46
3.3	Trois méthodes de routage statique multi-sauts	46
3.3.1	Introduction	46
3.3.2	Topologie proposée	47
3.3.2.1	Méthode S-Rhombus	47
3.3.2.2	Méthode S-Square	47
3.3.2.3	Méthode S-Circle	48
3.3.3	Résultats de la simulation	50
3.3.3.1	Consommation d'énergie pour chaque noeud	50
3.3.3.2	Nombre de messages transmis	52
3.3.4	Conclusion	54
3.4	Conclusion	54

Chapitre 4 : Proposition d'un algorithme de routage intelligent pour les RCSFS

multi-sauts		55
4.1	Introduction	56

4.2	Algorithmes de problème du voyageur de commerce (Colonies de Fourmis)	57
4.2.1	Algorithmes de colonies de fourmis	57
4.2.2	Fonctionnement de l'algorithme	57
4.2.3	Résultats	58
4.3	Inspiré de Colonie de fourmis : Algorithme de routage intelligent du réseau de capteurs sans fil	60
4.3.1	Algorithme d'optimisation des colonies de fourmis	61
4.3.2	Algorithme proposé	61
4.3.3	Résultats de la simulation	64
4.4	Conclusions	69
	Conclusion générale et perspectives	71
	Bibliographie	73



LISTE DES ACRONYMES

ACO	Ant Colony Algorithm
ACS	Ant Colony System
APTEEN	Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
AS	Ant System
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
AS-Rank	Rank-Based Ant System
DD	Directed Diffusion
DSP	Digital Signal Processors
EARCBSN	Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks
EARLEAHSN	Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks
EAS	Elitist Ant System
ECPSOA	Endocrine Cooperative Particle Swarm Optimization Algorithm
ERP	Evolutionary-based clustered Routing Protocol
FEC	Forward Error Correction
FL	Fuzzy Logic
FPGA	Field Programmable Gate Array
GA	Genetic Algorithm
GAF	(Geographic Adaptive Fidelity
GAOUP	Genetic Algorithm inspired Routing Protocol
GBR	Gradient-Based Routing
GEAR	Geographic and Energy Aware Routing
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LEACH-C	Centralized Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

MatLab	Matrix Laboratory
Max-Min As	Maximum and Minimum Ant System
MECN	Minimum Energy Communication Network
M2M	Machine to Machine
NN	Neural Network
PEGASIS	Power-EXcient Gathering in Sensor Information Systems
PSO	Particle Swarm Optimization
QoS	Quality of Service
RCSF	Réseau de Capteurs Sans Fil
RF	Radio Fréquence
RL	Reinforcement Learning
SA	Simulated Annealing
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
SRA	Smart Routing Algorithm
TEEN	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
TPG	Théorème de Pythagore Généralisé
WSN	Wireless Sensor Network



LISTE DES FIGURES

1.1	Un exemple d'un réseau de capteurs sans fil.	7
1.2	Architecture d'un noeud capteur.	8
1.3	Pile protocolaire.	9
1.4	Aplication des réseaux de capteurs sans fil.	11
2.1	Principaux protocoles de routages dans les RCSFs.	22
2.2	Topologie hiérarchique.	23
2.3	Routage data-centric.	26
3.1	Trois noeuds positionnés dans l'espace avec $0 \leq \gamma \leq \frac{\pi}{2}$	40
3.2	Trois noeuds positionnés dans l'espace avec $\frac{\pi}{2} < \gamma < \pi$	41
3.3	Modèle de dissipation d'énergie radioélectrique [HCB02].	41
3.4	Plus court chemin des noeuds lorsque le premier noeud est mort	43
3.5	Noeuds morts sont ignorés dans le réseau et les prédécesseurs de morts noeuds ont choisi leurs nouveaux successeurs	44
3.6	Plus court chemin des noeuds au puits, après 1200 itérations	44
3.7	Plus court chemin des noeuds au puits, après 1230 itérations, encore une fois, un autre noeud est mort	44
3.8	Énergie totale consommée pour chaque 10 noeuds encore en vie	45
3.9	Énergie résiduelle pour chaque 10 noeuds encore en vie	45
3.10	Après 1230 itérations : l'énergie résiduelle et l'énergie totale consommée par chaque 10 noeuds encore vivants	45
3.11	Trois méthodes proposées du routage dans un RCSF (WSN)	48
3.12	Modèle de dissipation d'énergie radioélectrique [HCB02]	49
3.13	Consommation d'énergie pour chaque noeud selon d_{cel} : 10, 20 et 30.	50
3.14	Consommation d'énergie pour chaque noeud selon d_{cel} : 40, 50 et 60.	51
3.15	Consommation d'énergie pour chaque noeud selon d_{cel} : 70 et 80.	51
3.16	Consommation totale d'énergie selon $d_{cel} = 10\dots 80$ pour S-Rhombus ,S-Square et S-Circle.	51
3.17	Nombre de messages transmis pour chaque noeud selon d_{cel} : 10, 20 et 30.	52
3.18	Nombre de messages transmis pour chaque noeud selon d_{cel} : 40, 50 et 60.	53
3.19	Nombre de messages transmis pour chaque noeud selon d_{cel} : 70 et 80.	53
4.1	itime=90	58
4.2	itime=120	59
4.3	itime=160	59
4.4	Résultat final : le meilleur chemin	59
4.5	Meilleur coût itératif et noeud de branchement moyen par temps itératif	60

4.6	Radio energy dissipation model, adopted from [HCB02].	62
4.7	Station de base au milieu et les noeuds sont dispersés arbitrairement.	65
4.8	Chemins construits en itérations 1–15.	66
4.9	Chemins construits en itérations 16–20.	66
4.10	Chemins construits en itérations 21 - -35.	67
4.11	Chemins construits en itérations : 36 - -50.	67
4.12	Consommation d'énergie par chaque noeud dans chaque itération.	68
4.13	Énergie résiduelle de chaque capteur pour 50 itérations.	68
4.14	Énergie consommée par chaque capteur pour 50 itérations.	69
4.15	Énergie résiduelle de chaque capteur pour 50 itérations.	69



LISTE DES TABLEAUX

2.1	Comparaison de différents protocoles de routages des réseaux de capteurs	28
3.1	Caractéristiques radio utilisées dans nos simulations	43
3.2	Distance entre le capteur et son prochain voisin : méthode S-Rhombus	47
3.3	Distance entre le capteur et son prochain voisin : méthode S-Square	47
3.4	Distance entre le capteur et son prochain voisin : méthode S-Circle	48
3.5	Caractéristiques radio utilisées dans nos simulations	50
3.6	Nombre de messages transmis jusqu'à ce que le premier noeud soit épuisé (mort) pour chaque d_{cel} dans : S-Circle, S-Square et S-Rhombus.	53
4.1	Caractéristiques radio utilisées dans nos simulations.	65

Contexte général

L'évolution croissante scientifique et technologique a mené à la miniaturisation des composants micro-électroniques, micro-mécaniques et de communication (Micro Électro Mechanical Systems (MEMS)), celle-ci a permis la naissance des nouvelles générations des réseaux informatiques et télécommunications, comme celles des réseaux de capteurs sans fil. Ces réseaux de capteurs sans fil sont des réseaux ad-Hoc comprenant un grand nombre de petits appareils micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnantes de manière autonome. Les réseaux de capteurs sans fil peuvent combiner des données du monde physique (par exemple la température de l'appareil utilisé) avec celles du monde des machines (par exemple, la vitesse d'activité de l'appareil) pour mieux contrôler et surveiller les systèmes industriels. En effet, les valeurs des grandeurs physiques livrées par les réseaux de capteurs sans fil donnent la possibilité de savoir et d'imaginer les situations dont ces organes sont utilisés. Ainsi affectent leurs performances (p. ex., expansion des composants métalliques due à l'augmentation de température en été), leurs durées de vie et leurs fiabilités. Les réseaux de capteurs sans fil révolutionnent la surveillance biomédicale, car elle est presque en temps réel et à moindre coût (moins de personnels nécessaires pour le traitement). Ainsi, réduire les dépenses dans le domaine de la santé. L'infiltration de produits toxiques dans le sol est un phénomène mal maîtrisé dans la plupart des cas. Mais la surveillance de déchetteries avec les réseaux de capteurs sans fil peut améliorer la situation. L'idée consiste à placer des micros capteurs capables de reconnaître les phases dans des mélanges air/eau /sol, et qui traiteraient le signal de manière collaborative pour concentrer la surveillance (p. ex., déclencher des algorithmes d'analyse de la teneur en produits chimiques) dans les zones à risques, le but est d'identifier et d'observer les utilisations potentielles de l'eau recyclée comme substitut ou supplément à la nappe phréatique. Concernant la surveillance environnementale, elle permet d'étudier le comportement de la faune et de la flore dans le temps. Par exemple, un réseau de capteurs sans fil a été déployé sur une île pour étudier le comportement et les conditions optimales pour la reproduction d'une espèce d'oiseaux spécifiques. Leur développement rapide dans de multiples domaines grâce à leurs nombreux avantages à savoir : leur petite taille, l'aisance de déploiement, leur faculté de transmission presque en temps réel, leur faible désordre de l'environnement, leur faible coût et le faible coût d'installation, la possibilité de distribution sur une grande surface ainsi que la contenance d'auto-configuration. Toutefois, les RCSFs ont aussi quelques contraintes qui motivent plusieurs chercheurs. En effet, tous les éléments capteurs ont besoin d'énergie pour fonctionner. Mais leurs ressources sont limitées en matière d'énergie : la ressource énergétique du noeud capteur est généralement une batterie. Toutefois, dans la plupart des applications des réseaux de capteurs, les noeuds sont déployés dans des environnements hostiles et il n'est pas pratique de recharger ou de remplacer leurs batteries. De ce fait, la durée de vie globale du réseau dépend complètement de celle de la batterie. À tel point que la contrainte liée à l'énergie constitue le problème fondamental. Ainsi, la maîtrise de la consommation d'énergie d'un noeud reste une problématique majeure pour l'aug-

mentation de la durée de vie du réseau. En outre, une large partie de l'énergie est consommée pendant les communications directes sans fil entre les capteurs et la station de base dans les transmissions fréquentes et de longues distances. Par conséquent, dans ce travail, nous proposons des algorithmes de routage qui évitent le contact direct entre chaque noeud et la station de base favorisant en général les petites distances entre les capteurs pour réduire au minimum les communications coûteuses en matière d'énergie, afin de minimiser l'énergie consommée et ainsi prolonger la durée de vie du réseau.

Contributions

Dans ce rapport, nous abordons le problème de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs homogènes sans fil. Nous avons réalisé une étude analytique modélisée sur le comportement énergétique d'un noeud et sur la distribution d'énergie dans le réseau, et nous avons proposé quelques méthodes et algorithmes de routage dans les réseaux de capteurs afin de réduire l'énergie consommée et par conséquent augmenter leur durée de vie.

Listes des publications

Revue internationale

Saleh BOUARAFA, Rachid Saadane, Moulay Driss Rahmani "Inspired from ants colony : Smart routing algorithm of wireless sensor network", Information (Switzerland) 9(1), 23. 2018.

Saleh BOUARAFA, Rachid Saadane, Moulay Driss Rahmani and Driss Aboutajdine, "Study of energy consumption in wireless sensor networks using S-rhombus, S-square and S-circle deployment", Lecture Notes in Computer Science (LNCS) (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI) and Lecture Notes in Bioinformatics (LNBI), Vol. 10542, pp.402-410, 2017

Conférences internationales

Saleh BOUARAFA, Rachid Saadane, Moulay Driss Rahmani and Driss Aboutajdine, "Study of energy consumption in wireless sensor networks using S-rhombus, S-square and S-circle deployment", The Third International Symposium on Ubiquitous Networking (UNET 2017), 2017

Saleh BOUARAFA, Rachid Saadane and Driss Aboutajdine, "Reduction Of Energy Consumption In WSN Using The Generalized Pythagorean Theorem ", 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2016.

Conférences nationales

Saleh BOUARAFA, Rachid Saadane, Moulay Driss Rahmani and Driss Aboutajdine, "Algorithmes de Problème du Voyageur de Commerce (Colonies de Fourmis) pour la minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil" 3ème édition des Journées Scientifiques URAC n°29, 2015.

Saleh BOUARAFA, Brahim Elbhiri, Rachid Saadane, Moulay Driss Rahmani and Driss Aboutajdine "Réduction de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fils

en utilisant la méthode de relais basé sur le théorème de Pythagore généralisé ”, journées doctorales en technologies de l’information et de la communication(JDTIC), 2014.

Saleh BOUARAFA, Rachid Saadane, Moulay Driss Rahmani, ” Etude Comparative Entre quelques algorithmes de Routage : DSDV et DSR ”, Journées Doctorales en Technologies de l’Information et de la Communication (JDTIC), 2013.

Saleh BOUARAFA, Brahim Elbhiri, Rachid Saadane, Moulay Driss Rahmani and Driss Aboutajdine ,” Augmentation de la Durée de Vie de Réseau de Capteur Sans Fil : Routage Efficace en Energie ”, 2ème édition des Journées Scientifiques URAC n°29, 2013.

Saleh BOUARAFA, Rachid Saadane and Driss Aboutajdine ” Maximisation de la Durée de Vie de Réseau de Capteur Sans Fils en Moyennant le Routage Efficace en Energie ”, Journées Doctorales en Technologies de l’Information et de la Communication (JDTIC), 2012.

Saleh BOUARAFA, Brahim Elbhiri, Moulay Driss Rahmani and Driss Aboutajdine, ” Evaluer en terme de consommation énergétique les différente solutions MAC pour les WSNs”, 1ème édition des Journées Scientifiques URAC n°29, 2012.

RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FILS APPLICATIONS ET CHALLENGES

1.1	Introduction	6
1.2	Architecture d'un noeud capteur	6
1.3	Pile protocolaire dans un RCSF	8
1.3.1	Couche physique	9
1.3.2	Couche liaison de données	9
1.3.2.1	La sous-couche MAC	9
1.3.2.2	La sous-couche LLC	10
1.3.3	Couche réseau	10
1.3.4	Couche Transport	10
1.3.5	Couche application	10
1.3.6	Plans de gestion	11
1.4	Applications	11
1.5	Problèmes	12
1.6	Conclusion	19

1.1 Introduction

Un réseau de Capteurs sans fil (RCSF) est généralement un ensemble de noeuds miniatures appelés aussi capteurs, communicants entre eux via des antennes et avec la modulation d'une onde radio. Ces noeuds sont capables de fonctionner avec des ressources énergétiques et des capacités de calcul limitées. Chaque noeud est composé d'un capteur ou d'un actionneur et d'une carte réseau sans fil. Le capteur (ou l'actionneur) est dédié à une tâche spécifique telle qu'une détection de présence, une lecture de température ou la commande d'une électrovanne, etc. L'information produite par le capteur est alors transmise à la carte réseau du noeud qui la communique généralement via le réseau à une unité de contrôle ou de surveillance. Le déploiement des capteurs dépend de l'application. Cela peut être assez aléatoire comme dans le cas de l'observation des endroits naturels où le nombre de capteurs est de l'ordre de quelques milliers. Pour d'autres applications, le déploiement peut être très précis, c'est le cas pour la surveillance d'activité industrielle où le nombre de capteurs est plutôt de l'ordre de quelques centaines. La connectivité sans fil permet une plus grande flexibilité dans le déploiement que celui d'un réseau filaire qui nécessite du câblage. Dans certaines applications comme la surveillance à bord d'une frégate, le poids des câbles utilisées devient une surcharge conséquente. Pour les applications nécessitant la mobilité, la contrainte du câblage ne doit pas être remplacée par une solution gênante ou amenant de l'inertie. Un noeud doit donc provenir d'une volonté d'intégration. Les solutions disponibles à présent sont plutôt fondées à partir d'un micro-contrôleur uni à une composante radio spécifique. Ce rassemblement est un compromis caractérisé par une intégration insuffisante et une capacité limitée de calcul et de mémoire qui constitue une contrainte lorsque les protocoles deviennent de plus en plus complexes. De plus, si la solution doit être indépendante dans le domaine de l'énergie, ainsi elle permet d'avoir un impact simultané sur les coûts et sur la congestion. Donc les protocoles réseaux utilisés sont obligés de tenir compte de cette contrainte énergétique. En effet, le remplacement de l'entité réseau ou le renouvellement d'énergie après déploiement devient très coûteux (notamment pour les systèmes embarqués qui nécessitent un arrêt du système pour permettre de telle intervention) et parfois impossible selon la nature du déploiement (capteurs installés dans les zones de radioactivité). La portée des antennes de communication est aussi affectée par cette contrainte énergétique et l'étendu d'un réseau de capteurs dépasse souvent largement la portée des antennes utilisées. Cela force les noeuds capteurs à échanger des messages multi-sauts pour arriver à la destination. La figure 1.1 montre un modèle d'un réseau de capteurs où les noeuds capteurs usent une communication sans fil pour amener les données captées vers un noeud nommé noeud collecteur ou puits (sink en anglais), ou station de base (base station). Le noeud puits transfère ces données par Internet (ou par satellite) à travers un gateway à l'ordinateur central < *Gestionnaire de tâches* > pour les analyser et prendre des décisions. Ainsi, l'utilisateur peut envoyer des requêtes aux autres noeuds du réseau, précisant le type de données requises, puis récolter les données environnantes captées par le biais du noeud puits.

1.2 Architecture d'un noeud capteur

Les caractéristiques de divers capteurs, existants sur le marché, dépendent du type d'application. Nous citons à titre d'exemple, les capteurs d'humidité, de température, de pression, d'émissions gazeuses, etc. Quoique leurs caractéristiques sont différentes, leurs architectures matérielles restent similaires. Un capteur est composé principalement d'une unité de : captage, traitement, stockage, communication, et énergie. Des composants additionnels peuvent être ajoutés selon le domaine d'application [ASSC02a], comme par exemple un système de localisation tel qu'un GPS (Global Positioning System), un générateur d'énergie (exemple : cellules solaires) ou un

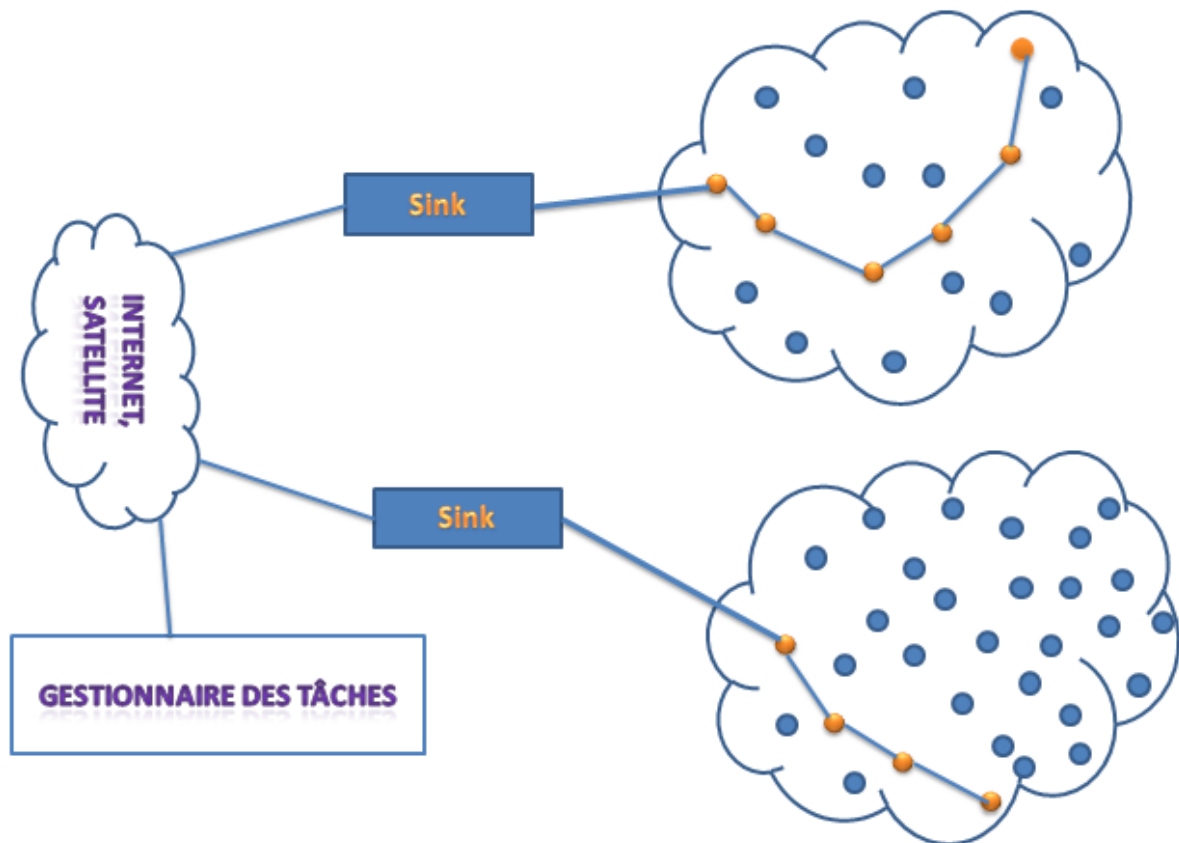


FIGURE 1.1 – Un exemple d'un réseau de capteurs sans fil.

mobilisateur lui permettant de se déplacer. Ces éléments principaux et optionnels (représentés par les rectangles à coins arrondis remplis en vert) sont visibles sur la figure 1.2.

1. **Unité d'énergie** : pour le fonctionnement de tous les composants d'un capteur, une source d'énergie est indispensable. Cette ressource, généralement une batterie, est précieuse surtout dans les environnements sensibles où il est impossible de recharger ou changer une batterie, car dans ce cas c'est elle qui détermine la durée de vie des capteurs et celle du réseau de capteurs.
2. **Unité de captage** : l'activité primordiale de l'unité de captage est de capturer ou mesurer les données physiques à partir de l'objet visé. Il contient deux sous-unités : le récepteur (reconnaissant la grandeur physique à capter) et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur offre des signaux analogiques, basés sur le fait observé, au Convertisseur Analogique/Numérique (CAN). Ce dernier change ces signaux en données numériques et les donne à l'unité de traitement. Un capteur peut avoir une ou plusieurs unités de captage [LSL⁺04].
3. **Unité de traitements (processeur)** : elle est composée d'une interface d'acquisition et d'une interface pour l'unité de transmission ainsi qu'un processeur et un système d'exploitation spécifique. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission. Les types de processeurs qui peuvent être utilisés dans un capteur incluent le Micro-contrôleur, les DSP (Digital Signal Processors), les FPGA (Field Programmable Gate Array) et les ASIC (Application Specific Integrated Circuit). Parmi toutes ces alternatives, le Micro-contrôleur a été le processeur le plus utilisé pour les capteurs à cause de sa flexibilité à être relié à d'autres composants (comme par exemple l'unité de communication), à son bon prix et sa faible consommation énergétique [QXW03, TP05].

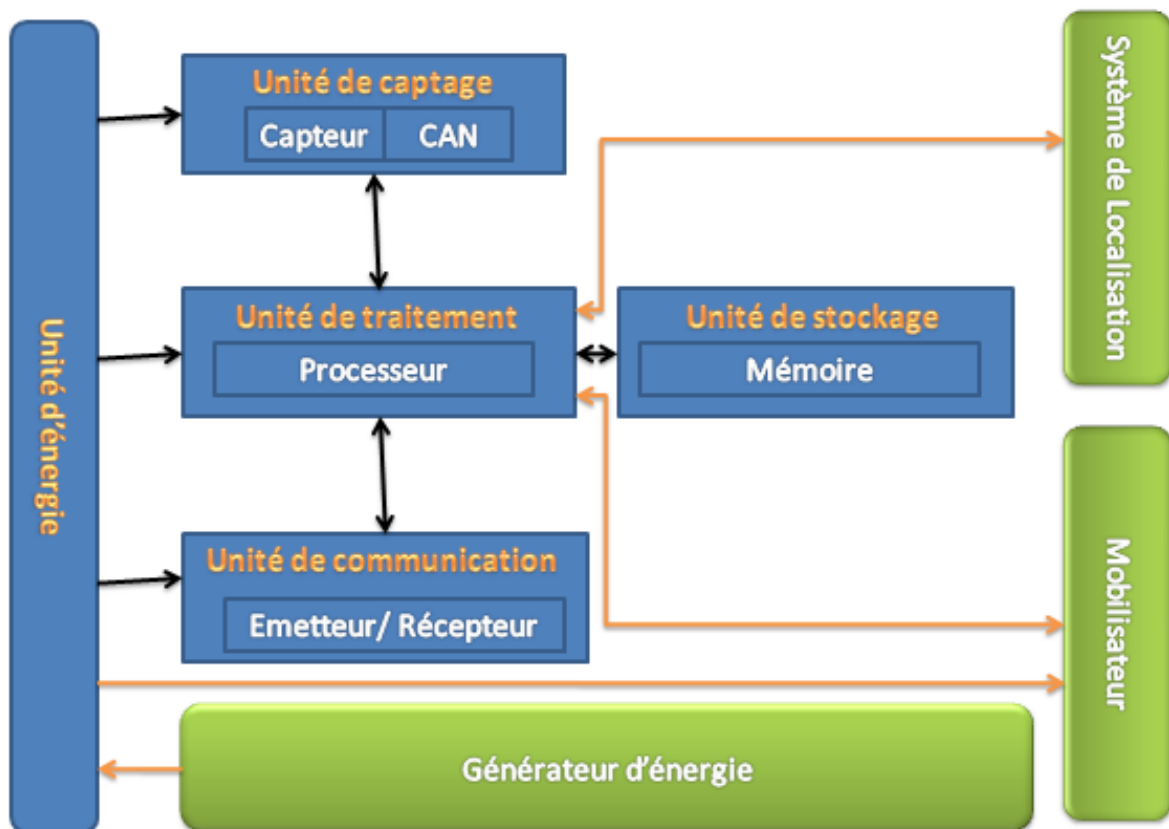


FIGURE 1.2 – Architecture d'un noeud capteur.

4. **Unité de communication** : les équipements étudiés sont donc fréquemment assurés d'une radio ainsi que d'une antenne. Cette unité sert à accomplir toutes les émissions et réceptions des données sur un support de communication sans fil. Elle peut être de type optique (comme dans les nœuds Smart Dust), ou de type radiofréquence (RF). Les communications du type optique sont fortes vis-à-vis des interférences électriques. Malgré cela, elles dévoilent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Donc, elles ne peuvent pas établir de liaisons à travers des obstacles. Cette unité représente la partie matérielle la plus consommatrice d'énergie.[KW07].
5. **Unité de stockage(Mémoire)** : elle comprend la mémoire de données et celle du programme. Pour des considérations économiques, la taille de cette mémoire est limitée, elle s'améliore progressivement au fil du temps [VKR⁺05].

1.3 Pile protocolaire dans un RCSF

Une pile de protocoles est une mise en place d'un ensemble de protocoles de communication réseau hors de commun où chaque couche s'appuie sur celles qui sont en dessous afin d'y amener un supplément de fonctionnalité. Dans l'usage des RCSFs, aucune pile protocolaire n'a été standardisée. Malgré cette non standardisation, une multitude des articles scientifiques considérant la thématique des RCSFs ont repris la pile protocolaire proposée par [ASSC02a]. La figure 1.4 élucide cette pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau. La pile comprend la couche physique, la couche liaison de données, la couche réseau, la couche transport, la couche application, la couche liaison de données, le plan de gestion de l'énergie, le plan de gestion de la mobilité et le plan de gestion des tâches. Suivant la fonctionnalité des capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et bâties sur la couche application

[SGP⁺07].

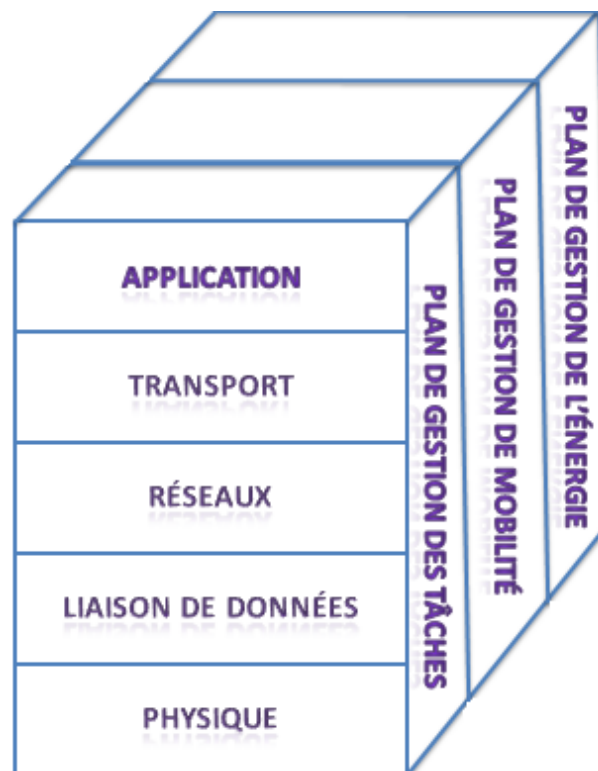


FIGURE 1.3 – Pile protocolaire.

1.3.1 Couche physique

Elle est responsable de la modulation/démodulation, le cryptage/décryptage des informations, la détection du signal, sélection de fréquence et la génération de la fréquence porteuse. Au niveau de cette couche, la consommation d'énergie peut être affectée par l'environnement de l'application, le choix du type de la modulation ou la bande de fréquence utilisée. Il est intéressant en matière d'économie d'énergie que le constructeur de la couche physique préfère une transmission à multi-sauts qu'une transmission directe qui requiert une énergie de transmission énormément grande[ASSC02a].

1.3.2 Couche liaison de données

Cette couche est constituée de deux sous-couches : la sous-couche MAC et la sous-couche LLC. La dernière permet la détection des erreurs des données binaires sorties de la couche physique. Alors que la sous-couche MAC s'occupe de gérer les stratégies d'allocations du canal et le temps de mise en veille de l'émetteur-récepteur.

1.3.2.1 La sous-couche MAC

La sous-couche MAC [ASSC02a] est chargée de mettre en place les instruments suivants :

- **Les instruments d'accès au canal** : le contrôle de l'accès et le partage du canal entre les différents noeuds désirants participer et communiquer entre eux dans un réseau.
- **Les stratégies de mise en veille des capteurs** : la réduction de la consommation d'énergie à travers la mise en veille de l'émetteur-récepteur pour préserver l'état de charge de la batterie. De plus, ces stratégies usées dépendent des mécanismes d'accès au canal.

- **Les trames de communications** : elles traduisent la mise en forme syntaxique des données sorties de la couche physique. Elles permettent entre autres d’initier les communications entre les entités, de gérer les modes de communication ou encore de détecter les éventuelles erreurs introduites par le canal de propagation. Leur mise en oeuvre passe généralement par l’insertion de diverses informations (les bits additionnels, entêtes, somme de contrôle...) essentielles au récepteur pour décider le début et la fin d’une trame ou chaque champ utile qui la compose (adresse, données, champs de synchronisation). La détection des erreurs introduites par le canal est quant à elle généralement réalisée via un ensemble de contrôles (checksum en anglais) qui est inséré par l’émetteur et ensuite jugé par le récepteur via la couche LLC.

1.3.2.2 La sous-couche LLC

La sous-couche LLC a pour responsabilité de découvrir les erreurs des données binaires sorties de la couche physique. La méthode de contrôle d’erreurs particulièrement utilisée dans les réseaux RCSF est le $\langle ForwardErrorCorrection \rangle$ (FEC); cette technique conçoit de simples mécanismes de codage et de décodage (codes de contrôle d’erreurs simples)[ASSC02a].

1.3.3 Couche réseau

La couche réseau : l’objectif le plus important de cette couche est de découvrir un chemin et une transmission fiable des données, captées, des noeuds capteurs vers le puits "sink" en optimisant la situation de l’énergie des capteurs. Le routage dans les RCSFs emploie souvent le multi-sauts du noeud émetteur au noeud $\langle Sink \rangle$ vu les spécificités de ce type de réseaux. Ainsi, à cause des contraintes d’énergie et de scalabilité[AY05] les protocoles de routage classiques des réseaux ad hoc sont inadaptés pour les RCSFs. Les métriques considérées dans l’optimisation des coûts des chemins dans les RCSF sont :

- Le temps d’acheminement des paquets.
- L’énergie nécessaire pour transmettre le paquet [ASSC02a].
- L’énergie disponible dans chaque noeud capteur.

Quant à l’adressage dans les RCSFs, l’adressage géographique est souvent employé, ce type d’adressage est utilisé notamment dans les applications de surveillance[AGKL05]. Donc chaque noeud capteur est identifié dans le réseau par sa position géographique.

1.3.4 Couche Transport

Cette couche est chargée à transporter les données, les découper en paquets, contrôler le flux, de conserver l’ordre des paquets et de gérer les contingentes erreurs de transmission. Cette couche intervient dans la communication entre deux RCSFs entre un RCSF et Internet.

1.3.5 Couche application

Cette couche, gérée directement par les logiciels, est le niveau le plus proche des utilisateurs, qui garantit l’interface avec les applications. Dans la littérature, plusieurs protocoles ont été proposés pour cette couche :

- SMP ou (Sensor Management Protocol) permet à l’utilisateur l’exécution des tâches administratives relatives à la configuration du RCSF, la synchronisation entre les noeuds, la mise en marche/fermeture des noeuds, le déplacement des noeuds capteurs.

- SQDDP ou (Sensor Query and Data Dissemination Protocol) donne à l'utilisateur la possibilité d'interroger le réseau en s'appuyant sur la localisation des noeuds[ASSC02a].

1.3.6 Plans de gestion

Le plan de gestion d'énergie gère et contrôle l'utilisation de la batterie. Par exemple, si le noeud capteur arrive à un niveau faible de son énergie, il diffuse une information (alerte) à ses noeuds voisins par multicast qu'il ne peut pas participer au routage des paquets. Le plan de gestion de la mobilité aperçoit et mémorise le mouvement du noeud capteur et indique son placement. Ainsi, un retour arrière vers l'utilisateur est toujours maintenu et le noeud peut sauver les traces de ses noeuds voisins. En déterminant leurs voisins, les noeuds capteurs peuvent balancer l'utilisation de leur énergie et la réalisation de tâche. Le plan de gestion des tâches assure un ordonnancement des tâches de captage de données dans une région bien déterminée tout en évitant la redondance des tâches de captage par tous les noeuds de cette région au même moment, afin de réduire la consommation d'énergie sur le réseau. Le gain de ces trois plans réside dans le fait qu'ils garantissent une gestion optimale de la consommation d'énergie, de la mobilité et des tâches au niveau de chaque noeud capteur. Ces plans de gestion sont essentiels, pour que les noeuds capteurs puissent fonctionner collectivement d'une manière efficace pour préserver l'énergie, router des données dans un réseau de capteurs et partager les ressources entre les noeuds capteurs. Du point de vue global, il est plus efficace d'utiliser des noeuds capteurs pouvant collaborer entre eux. La durée de vie du réseau peut être ainsi prolongée.

1.4 Applications

Les RCSFs peuvent avoir beaucoup d'applications 1.4.

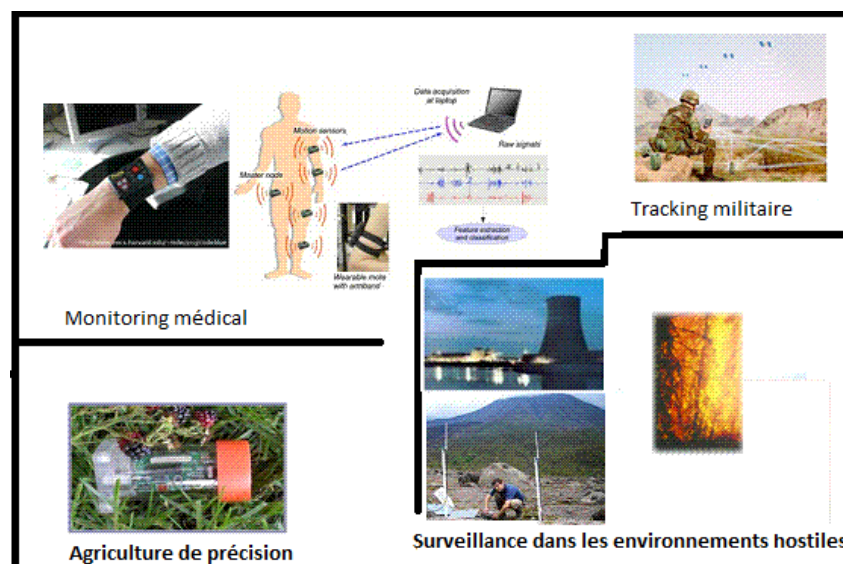


FIGURE 1.4 – Application des réseaux de capteurs sans fil.

Parmi elles, nous citons :

- Découvertes de catastrophes naturelles : on peut créer un réseau autonome en dispersant les noeuds dans la nature. Des capteurs peuvent ainsi signaler des événements tels que les feux de forêt, les tempêtes ou les inondations. Cela permet une réponse beaucoup plus rapide et efficace des sauvetages.
- Détection d'intrusions : en installant, à des points stratégiques, des capteurs, on peut donc

anticiper des cambriolages ou des passages de faune sur une voie de chemin de fer (par exemple Sans avoir besoin de dispositifs de contrôle coûteux.

- Applications métier : on imaginerait ici la nécessité de stocker des nourritures demandant une certaine température (Min ou Max) et un certain taux d'humidité. Dans ces applications, le réseau doit être capable de collecter ces informations et d'alerter en temps réel lorsque les seuils critiques sont dépassés.
- Contrôle de la pollution : les capteurs peuvent être dispersés sur un site industriel pour détecter et contrôler les fuites de gaz ou de produits chimiques. Ces applications fourniront un avertissement en un temps-record et pourront suivre l'évolution de la catastrophe.
- Agriculture : les noeuds peuvent être intégrés dans le sol. Le réseau de capteurs peut alors être interrogé dans le cas du champ (par exemple, pour identifier les secteurs les plus secs afin de les arroser en premier). Il est également possible d'équiper les troupeaux de bétail de capteurs pour connaître leur emplacement à tout moment, ce qui empêche les éleveurs d'utiliser des chiens de berger.
- Surveillance médicale : en implantant des capteurs micro-vidéo sous-cutanée, on peut obtenir des images en temps réel d'une partie du corps sans intervention chirurgicale de 24 heures. Nous pouvons aussi surveiller le développement de la maladie ou la reconstruction des muscles.
- Contrôle d'édifices : des capteurs peuvent être inclus sur les parois du barrage pour calculer la pression exercée en temps réel. Il est donc possible de réguler le niveau d'eau si la limite est atteinte. On peut aussi imaginer des capteurs entre les sacs de sable formant une digue de fortune. Une détection rapide des fuites d'eau peut être utilisée pour améliorer le barrage en conséquence. Cette technique peut également être utilisée dans d'autres installations telles que des ponts, des voies ferrées, des routes de montagne, des bâtiments et d'autres bâtiments.

1.5 Problèmes

Puisque de nombreux systèmes d'application WSN proposés impliquent de grands réseaux, il est essentiel de fournir des infrastructures de routage qui offrent simultanément un petit état de routage, un petit étirement de routage et une robustesse [FRZ⁺05, KGKS05, MWQ⁺07]. Un petit état est critique pour l'évolutivité et l'efficacité. Avec seulement quelques kilo-octets de mémoire dans un noeud de capteur typique, la réduction de l'état de routage permettra la prise en charge de grands réseaux. En outre, avec un état de routage plus petit, un trafic de maintenance inférieure est implicite, car ces deux sont généralement corrélés. Étant donné que la topologie des connaissances WSN et les changements de connectivité dues aux défaillances des noeuds et à l'impact sur l'environnement, la robustesse implique de gérer de tels changements efficacement. Plus précisément, pour réduire la consommation de ressources et l'interruption des composants systèmes de niveau supérieur, l'infrastructure de routage doit gérer les modifications du réseau avec un trafic et une latence minimales. L'importance critique de tout noeud de détection sans fil est de minimiser l'énergie consommée. Par conséquent, tous les protocoles de la pile réseau doivent être éco-énergétiques surtout les communications, car c'est la transmission de données qui consomme le plus d'énergie [TA05]. Du fait que le sous-système radio du noeud nécessite une quantité d'énergie considérable, il est approprié d'envoyer des données sur le canal radio uniquement lorsque cela est nécessaire. La meilleure façon, en matière de consommation d'énergie, devrait être choisie pour le transfert de données. De plus, il est important de minimiser l'énergie consommée par le capteur lui-même. Par conséquent, l'équipement doit être conçu pour permettre au sous-système de traitement de contrôler efficacement la puissance de la radio, du

capteur et du conditionneur de signal du capteur. L'objectif de mon travail de recherche est de concevoir, de mettre en oeuvre et de tester un nouveau protocole de routage de réseau de capteurs sans fil (WSN) qui coordonne les transmissions de noeuds de capteurs pour étendre le temps de fonctionnement du réseau et d'économiser de l'énergie dans des dispositifs à mémoire limités. Les principaux facteurs et contraintes qui affectent la structure des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit :

- Tolérance aux pannes : possibilité de maintenir des fonctions réseaux ininterrompus à cause d'une panne d'un ou de plusieurs capteurs. Les échecs n'affectent pas certains points en raison d'un manque de puissance ou d'un problème physique ou d'interférences sur le reste du réseau.
- La mise à l'échelle (scalability) : le nombre de noeuds répartis pour un projet peut atteindre un million. Un tel nombre important de noeuds génèrent beaucoup de transmissions interstitielles et nécessite que le "puits" soit bien équipé avec une grande quantité de mémoire pour stocker les informations reçues. L'ajout ou la suppression d'un ou plusieurs noeuds n'affecte en rien le fonctionnement du réseau et ne nécessite aucun effort pour le reconfigurer par l'utilisateur.
- Les coûts de production : les réseaux de capteurs sont souvent constitués d'un très grand nombre de noeuds et le prix du noeud est essentiel pour concurrencer le réseau de surveillance traditionnelle.
- L'environnement : les capteurs sont déployés collectivement sur les champs de bataille à l'extérieur des lignes ennemies, à l'intérieur de grandes machines, au fond de l'océan, dans des champs souillés biologiquement ou chimiquement. Ils doivent donc pouvoir fonctionner sans censure dans des zones géographiques éloignées.
- La topologie de réseau : le déploiement d'un grand nombre de noeuds nécessite la maintenance de la topologie. Cette maintenance comprend trois étapes : le déploiement, le post-déploiement (les capteurs peuvent se déplacer, ne fonctionnent plus, ...) et la redistribution (redéploiement) des noeuds supplémentaires.
- Les contraintes matérielles : la limitation principale du matériel est la taille du capteur. D'autres limites sont :
 - Réduire la consommation d'énergie du réseau pour survivre le plus longtemps possible,
 - S'adapter à différents environnements (fortes chaleurs, eau, ...),
 - Autonomie et résistance vu qu'ils sont souvent déployés dans des environnements hostiles.
- Les noeuds sont connectés par une architecture sans fil. Pour activer les opérations sur ces réseaux à travers le monde, le média de transmission doit être normé. L'infrarouge le plus couramment utilisé (ils sont libres de licence, forts pour les interférences et peu coûteux), la technologie Bluetooth et les communications radio Zig Bee.
- La consommation d'énergie : le capteur, dans sa taille, est limité en énergie (1 : 2 J). Dans la plupart des cas, il est impossible de remplacer la batterie. La durée de vie du capteur dépend fortement de l'autonomie de la batterie.

Dans chaque réseau de capteurs (plusieurs sauts ou multi-sauts), chaque noeud recueille des données et envoie/transmet des valeurs. Certains noeuds nécessitent une modification de la topologie du réseau et de la redirection de paquets. Comme tous ces processus sont gourmands en énergie,

la recherche actuelle se concentre principalement sur les moyens de réduire cette consommation. La consommation d'énergie est la contrainte principale.

La couche de routage joue un rôle crucial dans l'établissement de la communication entre la source et le noeud de destination. Dans la littérature, de nombreux travaux ont été proposés comme dans [AY05, AKK04, AB07, dRMA⁺12, ZAS12], pour fournir une vue d'ensemble de la conception et des défis des protocoles de routage.

En outre, les protocoles de routage sont généralement classés en fonction de la structure de réseau et aux opérations de protocole. Dans la suite, nous avons résumé différents niveaux qui ont un impact sur la conception des protocoles de routage.

1. Niveau de réseau : les paramètres de réseau tels que la structure de la topologie et les propriétés des noeuds peuvent affecter de manière significative les performances des protocoles de routage dans le RCSF. En outre, le déploiement de noeud et la mobilité sont des éléments importants à considérer. Nous discutons chaque paramètre.
 - Structure du réseau : deux structures importantes sont déterminées dans la littérature. La première est celle d'un réseau plat où tous les noeuds jouent généralement le même rôle et collaborent les uns avec les autres pour effectuer la tâche de détection. Dans une telle structure, tous les noeuds sont supposés être homogène, ayant une capacité égale en matière de calcul, communication et d'énergie. La deuxième structure est le réseau hiérarchique, également appelé réseau en grappe ("cluster"). Dans cette structure, les noeuds sont regroupés dans des grappes ("clusters") et joueront différents rôles dans le réseau. Les grappes ("clusters") sont formés dynamiquement et un noeud dans chaque groupe est élu en tant que chef ("leader"). L'avantage principal d'une telle architecture est d'assurer l'évolutivité et la communication d'énergie efficace. Dans une telle structure, si les noeuds sont généralement hétérogènes, ils rendent le routage plus difficile.
 - Déploiement de noeuds : les noeuds de capteurs peuvent être déployés de manière déterministe ou d'une manière aléatoire. Lorsque les noeuds sont déployés dans des positions impératives, le protocole de routage doit être adapté à la topologie du réseau fixe. Dans le cas aléatoire, les noeuds de capteurs sont répartis d'une manière aléatoire, créant une infrastructure personnalisée. Dans les deux cas, l'emplacement de puits (station de base appelée aussi "sink") est critique en matière d'efficacité énergétique et de performance.
 - Mobilité des noeuds : dans la plupart des cas d'application, il est supposé que les noeuds d'un réseau de capteur sans fil sont maintenus constants. Cependant, la mobilité du puits et la tenue du capteur sont parfois nécessaires dans de nombreuses applications. Le routage dans un réseau dynamique est plus difficile, car la stabilité de la route devient un problème important.
 - Caractéristiques du noeud : ceci est un autre paramètre qui affecte les performances de routage. Les caractéristiques du noeud incluent toutes les fonctionnalités que le noeud peut avoir sur le périphérique ou sur la partie de programme. En fait, les noeuds des RCSFs ont des capacités de stockage, de traitement et de calcul limitées. De telles contraintes, aux côtés de l'énergie limitée, posent des défis importants aux conceptions de protocoles de routage. Un autre point à considérer est la couverture de noeud et la connectivité qui sont spécialement régies par la puissance d'émission du noeud. La puissance de transmission peut être fixe ou dynamiquement réglable. Dans le cas précédent, l'utilisation d'une grande puissance de transmission conduite à assurer un réseau entièrement connecté et avoir un niveau de voisin élevé qui améliore le processus de routage. Cependant, un tel cas n'est rentable que dans les réseaux de petite

taille en raison de la grande consommation d'énergie et le problème d'interférence. Dans ce dernier cas, chaque noeud peut calculer le niveau de transmission d'énergie qu'il devrait être utilisé pour transmettre un message à un noeud voisin. Enfin, le noeud peut être équipé d'une unité supplémentaire telle que le GPS. Dans ce cas, le processus de routage peut être considérablement amélioré au moyen d'information de localisation fournie par les noeuds.

2. Niveau d'opération : chaque protocole de routage effectue différentes opérations pour établir une communication entre l'expéditeur et la partie réceptrice. La mise en oeuvre de l'application dépend des objectifs de l'application et des paramètres réseau décrits ci-dessus. Nous résumons ci-dessous les opérations les plus connues.

- Centré sur les données : un protocole de routage peut être conçu pour être un protocole centré sur les données si le routage basé sur les adresses traditionnelles ne peut pas être appliqué. En fait, ce n'est pas possible d'attribuer des identificateurs globaux à chaque noeud, principalement dans le cas de réseau. Par conséquent, pour dépasser cette contrainte, le noeud récepteur envoie des requêtes à certaines régions et attend des données des capteurs situés dans les régions. Les protocoles centrés sur les données, également appelés protocoles basés sur le contenu, nécessitent l'opération d'agrégation pour éviter une redondance significative. En fait, lorsque plusieurs noeuds de capteurs rejouent dans la même région que celle de puits, une réponse redondante peut arriver au noeud récepteur, ce qui conduit également à moins d'efficacité en matière de consommation d'énergie.
- Basé sur l'emplacement : les protocoles de routage sont basés sur la localisation s'ils ont besoin de la position de noeud pour transférer des données à la station de base. Dans cette catégorie de protocole de routage, également connu sous le nom de protocoles de routage géographique, chaque noeud est supposé connaître sa position géographique, les positions voisines et la position de la station de base. Le noeud peut obtenir ses informations de position en estimant la force du signal entrant en utilisant comme exemple le système de triangulation. Alternativement, l'emplacement des noeuds peut être disponible directement en communiquant avec un satellite, en utilisant le GPS (Global Positioning System), si les noeuds sont équipés avec un petit récepteur GPS de faibles puissances [XHE01]. L'information de voisinage peut être obtenue en échangeant des messages "Hello" entre des noeuds voisins.
- Intelligence essaim : le protocole de routage peut être conçu pour imiter le comportement collectif d'espèces biologiques telles que les fourmis ou les abeilles. L'objectif de cette catégorie, qui appartient aux protocoles méta-heuristiques, est de fournir une solution pour les problèmes NP-complets tels que le problème de routage, sans aucun contrôle supplémentaire ou coordination centrale. Les protocoles basés sur l'essaim sont auto-organisés, y compris une rétroaction positive, une rétroaction négative, une fluctuation, une amplification et interactions multiples [ZAS12]. Pour illustrer ces concepts, nous considérons l'optimisation des colonies de fourmis (ACO) à titre d'exemple. Quand les fourmis traversent un chemin vers le puits, ils augmentent une valeur de noeud local appelée phéromone. Cette action est un mécanisme de rétroaction positive pour inciter les autres fourmis à choisir le même chemin. Au contraire, l'évaporation des phéromones est une réaction négative dans le but de réduire le niveau de phéromone. De cette façon, les chemins les plus courts vers le puits peuvent être trouvés en conséquence.
- Agrégation de données : puisque les noeuds de capteurs peuvent générer des données redondantes significatives, des paquets de données similaires provenant de sources

multiples peuvent être agrégés, ainsi minimisant le nombre de transmissions et la consommation d'énergie. L'agrégation des données est : la combinaison de données provenant de différentes sources en utilisant différentes fonctions telles que la suppression, Min, Max et moyenne [KEW02b]. Certaines de ces fonctions peuvent être effectuées partiellement ou entièrement dans chaque noeud de capteur, en permettant des noeuds de capteurs pour effectuer la réduction des données dans le réseau [GFC11].

- **Routage Multipath** : les protocoles de routage peuvent utiliser plusieurs chemins plutôt qu'un chemin unique afin d'améliorer les performances de routage. Il y a deux options pour utiliser l'approche par trajets multiples. Premièrement, les chemins alternatifs peuvent être utilisés comme sauvegarde. L'objectif est d'améliorer la tolérance aux pannes de routage qui est mesurée par la probabilité qu'un autre chemin existe entre une source et une destination lorsque le chemin principal échoue. Cependant, cette option nécessite des frais supplémentaires pour maintenir en vie les chemins alternatifs. La deuxième option utilise plusieurs chemins en même temps à des fins d'équilibrage de charge qui peut réduire le retard "end To end". En outre, cette option peut être utilisée pour améliorer la fiabilité de la communication en envoyant plusieurs copies des mêmes données sur plusieurs chemins.
 - **Démarrage du processus de routage** : les protocoles de routage peuvent être conçus pour être des protocoles proactifs, interactifs ou hybrides. Pour les situations proactives, les routes sont calculées avant qu'elles ne soient pas vraiment nécessaires. Pour ce faire, chaque noeud stocke les informations de chemin vers tous les autres noeuds du réseau. Les protocoles proactifs sont seulement bénéfiques pour les petits réseaux puisque les messages échangés pour maintenir l'information d'itinéraire augmentent à un taux alarmant. Pour les protocoles réactifs, les noeuds sources calculent des routes uniquement lorsqu'elles sont nécessaires. Dans ce cas, chaque noeud stocke les routes uniquement à ses voisins immédiats, ce qui réduit considérablement le coût supplémentaire résultant. Enfin, dans le cas hybride (mixte), les protocoles utilisent une combinaison de schémas réactifs et proactifs. Le système proactif est utilisé dans un rayon donné, tandis que le système réactif est utilisé pour établir des routes vers des noeuds au-delà de la plage spécifiée (hors du rayon défini).
3. **Niveau de livraison des données** : le modèle de diffusion des données, également connu sous le nom de modèle de rapport, explique ce qui commence par le processus de déclaration des données. Cela dépend beaucoup de l'objectif de l'application. Le protocole de routage peut être fortement affecté par le système de livraison de données, ce qui réduit la consommation d'énergie et la stabilité du chemin [AY05]. Trois modèles de livraison sont décrits dans la littérature :
- **piloté par le temps** : dans ce modèle, chaque capteur envoie des données périodiquement. Le modèle de livraison basé sur le temps est adapté aux applications qui nécessitent un suivi périodique des données. En tant que tels, les noeuds de capteurs allumeront périodiquement leurs capteurs et transmetteurs, pour détecter l'environnement et transmettre les données d'intérêt à des intervalles de temps réguliers [AKK04]. Cependant, déterminer l'intervalle périodique précis est une tâche cruciale. En fait, de courtes périodes peuvent causer plus de trafic dans le réseau et ainsi plus de consommation d'énergie, tandis que de longues périodes peuvent conduire à perdre l'information puisque les noeuds sont gardés dormants entre deux périodes.
 - **piloté par les événements** : dans ce modèle, lors de la détection d'actions dans une zone surveillée, les noeuds signalent leurs données lorsqu'un événement se produit

dépassant certains seuils. Dans ce cas, le noeud source doit réagir immédiatement en établissant le chemin vers la station de base.

- piloté par la requête : pour ce modèle, la livraison des données commence une fois les noeuds concernés reçoivent une requête du noeud récepteur. Dans ce cas, le récepteur diffuse sa requête dans le réseau, tandis que les noeuds de capteurs tentent de résoudre cette requête, ils peuvent envoyer une réponse à la station de base. Nous remarquons qu'un modèle hybride peut être appliqué en utilisant une combinaison de deux ou de tous ces modèles discutés.
4. Niveau objectif : en général, les protocoles de routage sont conçus pour atteindre les objectifs de l'application. Certaines applications de capteurs nécessitent seulement la livraison réussie des messages entre la source et la destination. Alors que d'autres applications nécessitent plus d'assurance concernant la livraison en temps réel des messages, ce qui augmente la durée de vie du réseau ou la qualité du service. Le niveau objectif des protocoles de routage affecte directement le saut suivant à sélectionner. Dans la plupart des protocoles de RCSF, la sélection du prochain saut est un compromis entre différents critères pour atteindre différents objectifs. Dans la suite, nous discutons des objectifs clés associés aux protocoles de routage.
- Durée de vie du réseau : les protocoles de routage dans le but d'augmenter la durée de vie de réseau doivent s'assurer que le capteur est pleinement opérationnel aussi longtemps que possible. Pour ce faire, les protocoles tentent d'équilibrer la consommation d'énergie de manière égale entre les noeuds en tenant compte de leurs niveaux d'énergies résiduelles. Par conséquent, la sélection du prochain saut doit être un compromis de la consommation d'énergie avec d'autres paramètres.
 - Évolutivité : certaines applications nécessitent le déploiement d'un grand nombre de noeuds qui peuvent atteindre plus de milliers. Dans ce cas, le protocole de routage doit être capable de travailler avec ce grand nombre de noeuds de capteurs et de répondre rapidement et de manière fiable aux événements dans l'environnement. De plus, les protocoles de routage doivent pouvoir fonctionner correctement lorsque le nombre de noeuds dans le réseau augmente.
 - Tolérance aux pannes : dans des conditions réelles, certains noeuds peuvent être hors service en raison du manque de puissance, de dommages physiques ou d'interférences environnementales. La défaillance de ce noeud ne devrait pas affecter les performances globales du réseau ou la gestion des tâches. Alors, les protocoles de routage peuvent être conçus pour la tolérance aux pannes en effectuant certaines opérations de maintenance telles que la réparation locale du chemin de routage ou la recherche de sauvegarde de routage. En outre, les protocoles de routage peuvent ajuster les puissances d'émission et les débits de signalisation sur les liaisons existantes pour réduire la consommation d'énergie ou le ré-acheminement des paquets à travers les régions du réseau où plus d'énergie est disponible.
 - Livraison en temps réel : certaines applications nécessitent qu'un message soit délivré dans un délai déterminé, sinon le message devient inutile ou son information sur le contenu diminue après le temps limité. Les messages peuvent être retardés en raison d'un nombre élevé de relais de saut ou en raison d'opérations de traitement effectuées par les noeuds tels que l'agrégation de données ou la fusion de données. Par conséquent, l'objectif principal de ces protocoles est de contrôler complètement le retard du réseau. Dans le cas moyen, la performance de ces protocoles peut être évaluée en mesurant le message de rapport de livraison avec des contraintes de temps.

Nous pouvons résumer les plus importants problèmes dans les réseaux de capteurs sans fil comme ci-dessous :

- **Énergie** : telle que mentionnée précédemment, l'énergie est une ressource limitée dans les diverses applications des réseaux de capteurs sans fil. En fait, les noeuds utilisent typiquement une batterie non-rechargeable, généralement il n'y a aucun mécanisme pour produire de l'électricité. Il est généralement suggéré que le changement des batteries est difficile ou impossible. Selon l'application, les noeuds peuvent se trouver dans des endroits difficiles d'accès. Par conséquent, il s'ensuit qu'une efficace stratégie efficace doit être utilisée pour gérer correctement l'utilisation de l'énergie disponible.
- **Aucun environnement de communication contrôlable** : pour déployer un réseau de capteurs sans fil, il est habituel dans la littérature d'utiliser l'avion pour faire tomber des noeuds. Pour ce type de déploiement, le positionnement des capteurs n'est pas contrôlé. Le nombre des noeuds peuvent être fondés en dehors de la zone de couverture des autres noeuds, uniquement parce qu'ils sont trop loin, ou parce qu'ils sont tombés dans des endroits qui gênent la propagation des ondes radio ou simplement parce qu'ils ont été détruits. Dans ce cas, la connectivité de réseau sera un problème important à vérifier. Les réseaux (RCSFs) prennent en charge tous les problèmes liés aux communications sans fil, tels que les interférences, les pannes de collisions et les problèmes de sécurité. Les signaux radio transmis par les noeuds peuvent être gravement endommagés par des interférences dans l'environnement.
- **Topologie dynamique** : la topologie de réseau des RCSFs peut être modifiée très fréquemment. Ce changement de topologie peut être dû à la mobilité des noeuds. Même pour les applications où les noeuds sont fixés, des changements peuvent survenir lorsque des noeuds sont ajoutés ou supprimés, par action directe de l'utilisateur, en faisant varier l'état des noeuds (actif/sommeil), par l'épuisement de l'énergie, ou la défaillance des noeuds. Ce changement aléatoire de la disposition des noeuds nécessite que les noeuds doivent être auto-organisés en utilisant une méthode d'énergie efficace et un facteur d'échelle robuste.
- **Densité du réseau** : les réseaux de capteurs sont considérés comme des réseaux à très grande échelle déploiement de plusieurs centaines à plusieurs milliers de noeuds (chaque noeud peut avoir des dizaines de voisins). Cette densité, élevée dans le réseau, peut provoquer une congestion lors de la tentative de communication des noeuds en même temps. Par conséquent, des problèmes comme les retards dans la diffusion des messages et la perte de paquets sont présentés de manière puissante.

La densité du réseau est généralement exploitée pour augmenter la durée de vie de réseau, seulement en partageant le temps entre les capteurs à proximité. Le facteur de la mise à l'échelle est également important pour la conception de protocoles de communication et le traitement de données. Le routage des paquets doit être fait dans une énergie économique. De plus, pour contrôler la quantité d'informations transférées au " puits", les algorithmes robustes de fusion sont également considérés. Les deux exigences fondamentales des réseaux de capteurs sans fil sont :

- **Le coût du noeud** : un faible coût est exigé pour permettre un déploiement de réseaux à forte densité.
- **L'autonomie de fonctionnement** : le réseau doit fonctionner pendant toute la durée requise, malgré les pannes de noeuds et sans possibilités de ré-alimentation en énergie. En effet, généralement les noeuds sont placés dans des environnements hostiles (ex : à proximité d'un volcan [WALR⁺06] où l'homme ne peut pas y accéder.

À partir des exigences de coût et d'autonomie de fonctionnement, nous pouvons conclure les exigences suivantes : la faible consommation d'énergie : les noeuds contiennent une quantité limitée d'énergie, qui ne peut généralement pas être renouvelée. Par conséquent, la spécificité des réseaux de capteurs sans fil par rapport aux autres types de réseaux réside dans la priorité de la contrainte énergétique par rapport aux contraintes de qualité de service (QoS) [ASSC02b]. La qualité de service étant la capacité de fournir différentes priorités à différentes applications, utilisateurs, ou flux de données, ou à garantir un certain niveau de performance d'un flux de données [KT11] (Ex : taux de pertes des paquets entre la source et le destinataire, débit de transmission). On autorise, par exemple, la réduction du débit de transmission pour prolonger la durée de vie.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les réseaux de capteurs sans fil, l'architecture d'un noeud capteur, la pile protocolaire dans un RCSF, domaine d'application et l'ensemble de problèmes et critiques et challenges à prendre en compte pour concevoir des protocoles de routage robuste et économisant d'énergie. Dans le prochain chapitre, nous allons voir des protocoles et algorithmes de routage proposés dans la littérature.

LES PRINCIPAUX PROTOCOLES DE ROUTAGE DANS LES RCSF

2.1	Introduction	22
2.2	Les principaux protocoles de routage dans les RCSF	22
2.2.1	Les Protocoles hiérarchiques	22
2.2.2	Les protocoles de routage basés sur la localisation	24
2.2.3	Les protocoles de routage "data-centric"	26
2.3	Les principaux algorithmes de conservation d'énergie	28
2.3.1	L'algorithme de routage "EARLEAHSN"	29
2.3.2	L'algorithme de routage "EARCBSN"	29
2.3.3	L'algorithme de routage "GBR"	29
2.4	Les algorithmes intelligents	30
2.4.1	Méthodes basées sur des algorithmes intelligents	30
2.5	Conclusion	35

2.1 Introduction

De nombreux systèmes nécessitent de prendre en compte l'environnement. Les progrès de ces dernières années en micro-électronique ont permis de fabriquer des capteurs de plus en plus petits, de plus en plus performants et avec des autonomies énergétiques grandissantes. D'autre part, les techniques de réseaux mobiles permettent désormais de s'affranchir des fils et donc de déployer facilement des réseaux de capteurs, dans des endroits même difficiles d'accès. La propagation et la délivrance des données dans un RCSF représentent la fonctionnalité la plus importante du réseau. Elle doit prendre en considération toutes les caractéristiques des capteurs afin d'assurer les meilleures performances du système : durée de vie, fiabilité, temps de réponse, etc. Vues de la spécificité des RCSF, un nombre important de recherches sont orientées vers une violation du découpage en couches protocolaires indépendantes et introduisent la notion de "cross layer optimization". Par exemple, en utilisant des mécanismes d'agrégation, les routeurs intermédiaires doivent accéder à la donnée afin d'établir des résumés des lectures de la région. Il existe plusieurs types de protocoles de routage dans le réseau de capteurs sans fil. Ces protocoles de routage sont créés afin de permettre la prévention des collisions et l'économie d'énergie.

2.2 Les principaux protocoles de routage dans les RCSF

La figure suivante résume les principaux protocoles de routage [ASK08] :

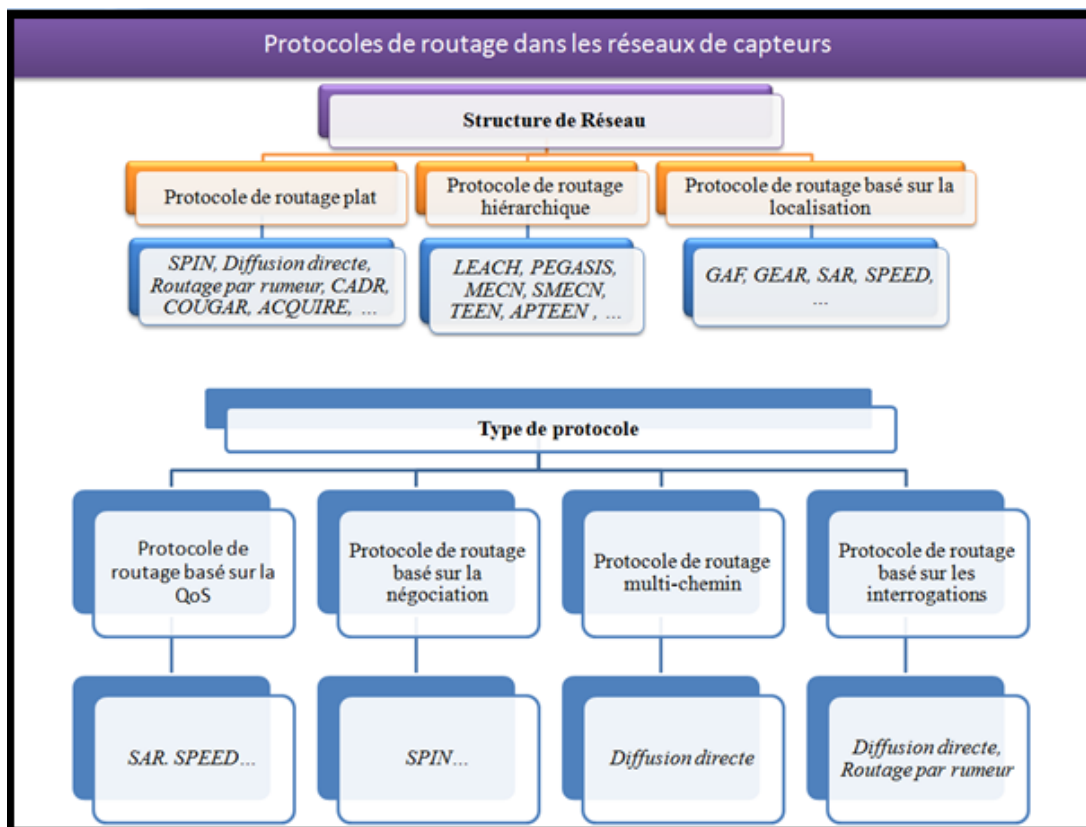


FIGURE 2.1 – Principaux protocoles de routages dans les RCSFs.

2.2.1 Les Protocoles hiérarchiques

Le but primordial du routage hiérarchique [AY05, AKK04] est le maintien efficace de la consommation d'énergie de noeuds de capteurs en les impliquant dans la communication multi-sauts au sein d'une grappe ("cluster") et en réalisant l'agrégation et la fusion des données pour

réduire le nombre de messages envoyés à la destination. La construction des grappes ("clusters") est généralement basée sur la réserve d'énergie des capteurs et sur les capteurs qui sont proches de chef de grappe ("cluster-head") (figure 2.2). LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical) [ASK08] est l'une des premières méthodes de routage pour les réseaux de capteurs. L'idée proposée par LEACH a été une source d'inspiration pour de plusieurs protocoles de routage hiérarchique, quoique certains protocoles aient été développés indépendamment.

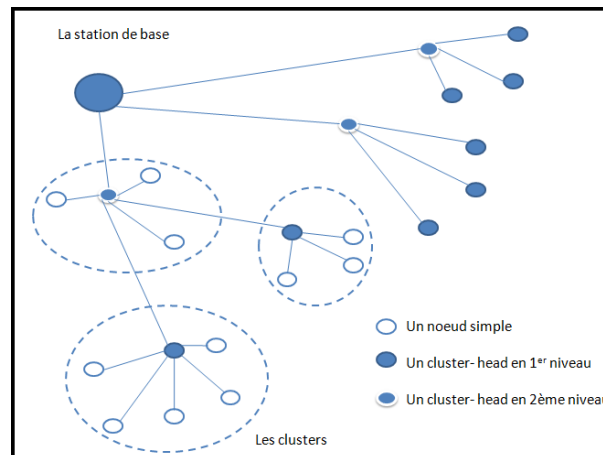


FIGURE 2.2 – Topologie hiérarchique.

2.2.1.1 Le protocole de routage "LEACH"

LEACH est l'un des algorithmes de routage hiérarchiques le plus fameux pour les réseaux de capteurs [ASK08, AY05, HCB00]. L'idée est de construire des clusters de noeuds de capteurs fondés sur les zones caractérisées par la réception des signaux forts. Après, les chefs de grappes ("clusters heads") locaux seront utilisés comme passerelle pour accéder à la destination. Cela permet d'économiser de l'énergie puisque les transmissions sont effectuées uniquement par les chefs du groupe (chef de grappe ou (cluster-head) au lieu de tous les noeuds de capteurs.

2.2.1.2 Les protocoles de routage "PEGASIS Hierarchical-PEGASIS"

Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS) [AY05] est une transposition du protocole LEACH améliorée. En effet : PEGASIS forme des chaînes de noeuds de capteurs à la place des clusters formés par LEACH dans ce cas-là, chaque noeud transmet et reçoit uniquement les données de son voisin. Un unique noeud est choisi finalement à partir de cette chaîne pour transmettre les données agrégées à la station de base. L'idée de PEGASIS est qu'il emploie tous les noeuds pour envoyer ou recevoir des données avec ses voisins les plus proches. Il déplace les données reçues de noeud à noeud, puis les données seront agrégées jusqu'à ce qu'elles arrivent toutes à la station de base. De ce fait, chaque noeud du réseau est tour à tour un chef de file de la chaîne, ainsi que responsable pour envoyer l'ensemble des données assemblées et fusionnées par la chaîne de noeuds au niveau de la station de base [LR02].

2.2.1.3 Les protocoles de routage "TEEN et APTEEN"

Les protocoles Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol (TEEN) [AM01] et Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol (APTEEN) [Sub04] sont convenables pour les applications délicates. Pour ces applications critiques, la réactivité est importante dont le réseau fonctionne dans un mode réactif. La valeur de l'attribut mesuré est un facteur clé dans les deux protocoles. L'aptitude à modifier la périodicité et les paramètres de TEEN en fonction des nécessités des utilisateurs et des applications est une distinctive additionnelle d'APTEEN. TEEN est créé pour être sensible à des changements inopinés des attributs

tels que la température. APTEEN est une extension de TEEN qui fait à la fois la collection des captures périodiques de données et qui réagit aux événements critiques. L'architecture du réseau de capteurs est basée sur un groupement hiérarchique où les noeuds forment des clusters et ce processus va se répéter jusqu'à ce que la station de base soit atteinte [AY05]. Quand la station de base forme des grappes ("clusters"), les chefs de grappes (clusters head) propagent les attributs, les valeurs des seuils, ainsi que le calendrier de transmission à tous les noeuds. Le chef de grappe ("cluster-head") réalise aussi l'agrégation de données afin d'économiser l'énergie.

2.2.2 Les protocoles de routage basés sur la localisation

Les protocoles de routage basés sur la localisation [AY05] usent les informations d'emplacement pour guider la découverte de routage et la transmission des données. Ils permettent la transmission directionnelle de l'information en évitant le débordement d'informations sur l'ensemble du réseau. Par conséquent, le coût de contrôle de l'algorithme est réduit et le routage est optimisé. De plus, la gestion du réseau devient simple avec la topologie réseau basée sur des informations de localisation de noeuds. L'inconvénient de ces protocoles de routage est que chaque noeud doit connaître les emplacements des autres noeuds.

2.2.2.1 Le protocole de routage "MECN"

Minimum Energy Communication Network (MECN) [RM99] est un protocole de routage qui met en place et maintient un réseau d'énergie minimum pour les réseaux sans fil en utilisant des GPS de faible puissance. Bien que le protocole suppose un réseau mobile, il est préférable de l'appliquer aux réseaux de capteurs, qui ne sont pas mobiles. Une topologie de puissance minimale pour les noeuds stationnaires comprenant un noeud maître est trouvée. MECN suppose qu'un maître est le puits d'information, ce qui est toujours le cas pour les réseaux de capteurs. MECN utilise une station de base comme destination de l'information, ce qui est toujours le cas pour les réseaux de capteurs. MECN identifie une région de relais pour chaque noeud. La région de relais se compose de noeuds dans une zone périphérique où la transmission à travers ces noeuds est plus économe en énergie que la transmission directe. L'idée principale de MECN est de trouver un sous-réseau qui a moins de noeuds et qui nécessite moins d'énergie pour la transmission entre deux noeuds quelconques. Cela est effectué en utilisant une recherche localisée pour chaque noeud en prenant en considération sa région de relais [AY05].

2.2.2.2 Le protocole de routage "GAF"

GAF (Geographic Adaptive Fidelity) [XHE01] est un protocole de routage appuyé sur la localisation des noeuds. Il a été créé spécifiquement pour les réseaux mobiles personnalisés. Toutefois, il est possible d'être applicable aux réseaux de capteurs. L'emplacement des noeuds dans GAF pourrait être pourvu avec la participation d'un GPS [AY05, DEG⁺01, SR02] où le protocole GAF décompose la zone de communication en petites grilles virtuelles où tous les noeuds dans une grille peuvent communiquer ensemble. à tout moment, un seul noeud dans une grille est actif à la fois tandis que les autres sont en état sommeil ou en état de découverte. Notons que les noeuds sources et puits de données ne participent pas dans le protocole GAF. Ainsi, ce système de partitionnement GAF assure la fidélité du routage, car il existe au moins un chemin entre un noeud et la station de base. GAF peut augmenter considérablement la durée de vie du réseau. En effet, un seul noeud dans chaque grille reste à l'état actif en faisant passer les autres noeuds de la grille à l'état de sommeil pour une certaine période de temps tout en assurant la fidélité du routage. Les noeuds les plus riches en énergie sont plus prioritaires pour entrer dans l'état actif. De cette façon, la stratégie GAF équilibre la consommation d'énergie entre les différents noeuds du réseau. Cependant, dans certains environnements où les noeuds

sont fortement mobiles, la fidélité du routage pourrait être réduite si un noeud actif quitte la grille. Ainsi, le taux de perte des paquets sera important.

2.2.2.3 Le protocole de routage "GEAR"

Le protocole de routage GEAR (Geographic and Energy Aware Routing) [YGE01, SR98, ZRLM09] a été suggéré par Y. Yu, D. Estrin. Il est conçu pour le routage des requêtes à des régions cibles dans un réseau de capteurs. Dans GEAR, chaque noeud est doté d'un GPS pour identifier son emplacement. Par ailleurs, GEAR utilise des heuristiques basées sur l'information géographique pour la sélection de noeuds pour acheminer les données vers la station de base. L'objectif principal dans GEAR est de limiter le nombre de cibles dans Directed Diffusion, la diffusion dirigée, en considérant uniquement une région plutôt que de viser l'ensemble des cibles dans les différentes régions de déploiement des réseaux. En procédant de cette manière, GEAR peut conserver plus d'énergie que le protocole Directed Diffusion. Dans GEAR, chaque noeud conserve un coût estimé et un coût d'apprentissage pour atteindre la destination à travers ses voisins. Le coût estimé est une combinaison de l'énergie résiduelle et la distance qui le sépare du noeud destinataire. Le coût d'apprentissage est un raffinement du coût estimé qui représente le routage autour des trous dans le réseau. Un trou se produit quand un noeud n'a pas de voisin proche dans la région cible. S'il n'y a pas de trou, le coût estimé est égal au coût d'apprentissage. Le coût d'apprentissage se propage un saut en arrière chaque fois qu'un paquet atteint la destination afin que la configuration de la route pour le prochain paquet sera ajustée. GAER s'exécute en deux phases :

- Transfert des paquets vers la région cible : à la réception d'un paquet, un noeud vérifie ses voisins pour voir s'il y a un voisin qui est plus proche de la région cible que lui-même. S'il y a plusieurs qui sont proches, le plus proche voisin de la région cible est choisi comme saut suivant. Si tous ses voisins sont plus loin de la région cible que le noeud lui-même, cela signifie qu'il y a un trou. Dans ce cas, l'un des voisins est prélevé pour transmettre le paquet sur la base de la fonction de coût d'apprentissage. Ce choix peut alors être mis à jour en fonction de la convergence du coût d'apprentissage lors de la livraison de paquets.

- La transmission des paquets au sein de la région : si le paquet a atteint la région, il peut être diffusé dans cette région géographique soit par le transfert récursif ou l'inondation restreinte. L'inondation restreinte est bonne lorsque les capteurs ne sont pas densément déployés. Dans les réseaux à haute densité, la transmission géographique récursive est économe en énergie que l'inondation restreinte. Dans ce cas, la région est divisée en quatre sous-régions et quatre copies du paquet sont créées. Ce processus, de fractionnement et transfert, continue jusqu'à ce que les régions avec un seul noeud soient épuisées. Il consiste à utiliser l'information géographique lors de la diffusion des requêtes aux régions cibles car les requêtes contiennent souvent des données géographiques. L'idée est de restreindre le nombre de données dans la diffusion dirigée en prenant en considération uniquement une certaine région, plutôt que d'envoyer les données à l'ensemble du réseau. Avec le protocole GEAR, chaque noeud maintient le coût pour atteindre la destination en passant par ses voisins. Ce coût est divisé en deux parties : un coût estimé et un coût d'apprentissage. Le coût estimé est une combinaison de l'énergie résiduelle et de la distance jusqu'à destination. Le coût d'apprentissage est un raffinement du coût estimé qu'un noeud dépense pour le routage autour des trous dans le réseau. Un trou se forme quand un noeud n'a pas de voisin proche par lequel il peut atteindre la région cible. S'il n'y a pas de trous, le coût estimé est égal au coût d'apprentissage. Le coût d'apprentissage se propage d'un saut à chaque fois qu'un paquet atteint la destination [AY05, YGE01].

2.2.3 Les protocoles de routage "data-centric"

Dans de nombreuses applications de réseaux de capteurs, vu le nombre élevé de noeuds déployés, il n'est pas possible d'attribuer des identifiants globaux à chaque noeud. Cette absence d'identification globale avec le déploiement aléatoire de noeuds de capteurs fait qu'il est difficile de sélectionner un ensemble spécifique de noeuds de capteurs à interroger. Par conséquent, les données sont généralement transmises de chaque noeud de capteurs dans la région de déploiement avec une redondance importante. Cette réflexion a conduit au routage data-centric [KEW02a] qui est différent du traditionnel routage où les routes sont créées entre les noeuds adressables gérés dans la couche réseau. Le destinataire envoie des requêtes à certaines régions et attend des données à recevoir provenant des capteurs situés dans les régions sélectionnées. Comme les données sont-elles demandées à travers des requêtes, le nommage est nécessaire pour préciser les propriétés des données [AY05]. Comme la montre l'exemple d'une approche data-centric dans la figure 2.3, les données provenant des deux sources sont agrégées au noeud B. Ensuite, la donnée combinée ($1 + 2$) est envoyée de B vers la destination.

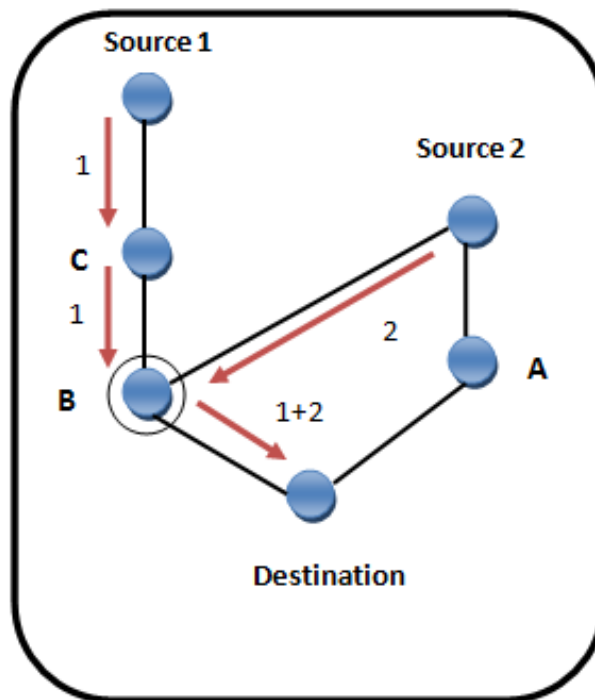


FIGURE 2.3 – Routage data-centric.

2.2.3.1 Le protocole de routage "SPIN"

Un réseau de capteurs sans fil se constitue de nombreux capteurs qui sont déployés dans plusieurs régions. L'accès aux données d'un événement spécifique pour une région ou une zone spécifique peut faire une grande différence. Des mesures peuvent être prises pour l'obtention de données à partir d'un endroit ciblé. Les données sont captées auprès de tous les capteurs et déplacées de manière redondante sur le réseau, ce qui entraîne une utilisation futile de l'énergie. Pour solutionner ces genres de problèmes, les systèmes de routage data-centric ont évolué : la destination envoie des requêtes pour les capteurs du réseau dans un lieu destiné. Les attributs sont utilisés pour solliciter des données résultant des capteurs. SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) [QKX02] est le premier protocole data-centric qui a été produit pour les réseaux de capteurs sans fil. Il présente certaines similitudes par rapport à la diffusion dirigée. Il est axé sur la réduction des données redondantes et économise l'énergie [AY05].

La diffusion est le processus de collecte des observations de l'ensemble des capteurs individuels qui sont déployés dans le réseau et où tous les capteurs sont traités comme des noeuds destination [AGCV08]. Les tâches confiées à ces capteurs sont de recueillir le point de vue complet de l'environnement sous la forme de données et de renforcer une structure de réseau avec une tolérance aux fautes. La consommation d'énergie pendant les calculs et les communications doit être contrôlée pour prolonger la durée de vie des capteurs au sein du réseau.

2.2.3.2 *La diffusion dirigée*

La diffusion dirigée [IGE00, EGHK99] est un protocole considérable dans le routage data-centric des réseaux de capteurs. L'idée concerne la propagation des données aux noeuds en maniant un système de dénomination de données. Le but majeur de l'usage de ce système est d'éliminer le routage inutile de la couche réseau. Pour ne pas dépenser, de manière banale, plus d'énergie. La diffusion dirigée conduit à l'utilisation de paires attribut-valeur pour les données et les requêtes des capteurs. Pour créer une requête, le noeud est défini à l'aide d'une liste de paires d'attributs et de valeurs, telles que l'intervalle, le nom d'objet, la durée, la région géographique, etc. Un paquet est diffusé par ce noeud à la destination par l'intermédiaire de ses voisins. Chaque noeud peut stocker les paquets reçus pour les utiliser ultérieurement. Les paquets stockés sont ensuite employés pour comparer les données reçues. La requête inclut également certains champs de gradient. Un gradient est un lien de réponse avec un voisin dont le paquet a été reçu et qui est caractérisé par le débit, la durée et la date d'expiration de données. Ainsi, des chemins sont bâtis entre la destination et les sources par la mise en oeuvre des intérêts et les gradients. Différents chemins peuvent être créés pour que l'un d'entre eux soit choisi par renforcement. La destination retransmet le message d'intérêt initial via le chemin sélectionné. Par conséquent, le plus petit intervalle renforce le noeud source sur ce chemin pour transmettre les données de manière fréquente. [AY05].

2.2.3.3 *Le protocole de routage par rumeur*

Le routage par rumeur [RT99, KEW02a] est particulièrement conçu pour des applications où le routage géographique n'est pas possible. En général, la méthode (diffusion dirigée) use l'inondation pour transmettre la requête à l'ensemble du réseau où il n'y a pas de critère géographique pour diffuser les tâches. Pourtant, dans certains cas, peu de données sont-elles demandées par les noeuds, donc l'utilisation d'inondation est inutile [AY05]. L'idée clé de cette méthode est de trouver les routes pour les requêtes vers les noeuds qui ont observé un événement remarquable, plutôt que d'inonder tout le réseau afin de récupérer des informations sur les événements apparus. Pour propager un événement sur le réseau, l'algorithme de routage par rumeur emploie des paquets appelés agents. Quand un noeud détecte un événement, il ajoute cet événement à sa table locale, appelée table d'événements et génère un agent. Cet agent parcourt le réseau pour diffuser des informations sur des événements locaux pour les noeuds distants. Quand un noeud génère une requête pour un événement, les noeuds qui connaissent le chemin, répondent à la requête en vérifiant leur table événement. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'inonder tout le réseau, ce qui réduit le coût de communication. D'autre part, ce routage n'utilise qu'un seul chemin entre la source et la destination au lieu de la diffusion dirigée où les données peuvent être acheminées par des routes multiples. Les résultats de simulation ont montré que le routage par rumeur peut réaliser des économies d'énergie significatives par rapport à la méthode d'inondation et peut également préserver la vie du noeud. Toutefois, le routage par rumeur fonctionne bien uniquement lorsque le nombre d'événements est faible. Pour un grand nombre d'événements, le coût du maintien des agents et des tables d'événements de chaque noeud devient impossible. La table 2.1 représente un comparatif de quelques protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil.

TABLE 2.1 – Comparaison de différents protocoles de routages des réseaux de capteurs

	Classification	Mobilité	Basé sur la négociation	Agrégation	Mise à l'échelle	Multi-chemin	L'utilisation d'énergie
LEACH	Hiérarchique	station de base fixe	Non	Oui	Bonne	Non	Max
PEGASIS	Hiérarchique	station de base fixe	Non	Non	Bonne	Non	Max
Hierarchical PEGASIS	Hiérarchique	station de base fixe	Non	Non	Bonne	Non	Max
TEEN and PTEEN	Hiérarchique	station de base fixe	Non	Oui	Bonne	Non	Max
MECN	Hiérarchique	Non	Non	Non	Faible	Non	Min
GBR	Plat	Limitée	Non	Oui	Limitée	Non	Min
SPIN	Plat	Possible	Oui	Oui	Limitée	Oui	Limitée
La diffusion dirigée	Plat	Possible	Oui	Oui	Limitée	Oui	Limitée
Routage par rumeur	Plat	Très limitée	Non	Oui	Bonne	Non	Min
GAF	Géographique	Limitée	Non	Non	Bonne	Non	Limitée
GEAR	Géographique	Limitée	Non	Non	Limitée	Non	Limitée

2.3 Les principaux algorithmes de conservation d'énergie

Plusieurs algorithmes de routage ont été typiquement imaginés pour les réseaux de capteurs dans lesquels la consommation d'énergie est une factrice principale. Ce facteur a posé de nombreux gageures à la conception et à la gestion des réseaux de capteurs. Ces challenges demandent de gérer efficacement l'énergie pour toutes les couches de la pile protocolaire de réseau. Pour plusieurs sortes d'applications de capteurs, les difficultés attachées aux couches liaison et physique sont souvent communs. Pour la couche réseau, le but capital est de découvrir des solutions pour mettre en oeuvre efficacement de l'énergie et pour diffuser d'une manière fiable les données de la source vers la destination d'une telle façon qui maximisera la durée de vie du réseau. Certains algorithmes ont été mis au monde afin de prendre en charge le contrôle de la capacité. D'autres se focalisent sur le temps d'activation des noeuds des capteurs [KKW⁺03] et son effective utilisation. L'auteur de [LH05] a contribué par un algorithme qui porte sur les techniques conservatrices de diffusion des messages, cet algorithme de diffusion efficace de l'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil permet de réaliser les économies d'énergie. Il a accentué de même

que l'efficacité du réseau pourrait être améliorée par la technique de routage pour une énergie efficace [YYA02]. La recherche dans le domaine des protocoles d'efficacité énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil est relativement récente. L'objectif principal de tous ces protocoles et algorithmes est de trouver des moyens efficaces sur l'économie énergétique, maximisant ainsi la durée de vie du réseau. Pour atteindre cet objectif, de nombreux protocoles ont été développés. Ces protocoles utilisent différentes stratégies pour obtenir leurs chemins. Certains de ces protocoles utilisent le "clustering", les fonctions, les équations, les arbres de routage optimal, les recherches multipistes ou un mécanisme efficace de détournement des trous. Par exemple, les "clusters-head" qui sont considérés comme des routeurs sont utilisés par le protocole "LEACH" pour garantir une communication efficace en terme d'énergie. Et puisque la communication sera effectuée uniquement entre les "clusters-head". Alors, l'énergie sera préservée. Les algorithmes d'énergie efficaces les plus populaires sont :

2.3.1 L'algorithme de routage "EARLEHNSN"

L'algorithme Energy Aware Routing for Low Energy Ad-Hoc Sensor Networks (EARLEHNSN) [SR02] use un ensemble de sous-chemins optimaux pour augmenter la longévité du réseau. Une fonction de probabilité dépendante de la consommation énergétique de chaque route est moyennée pour choisir ces chemins [AY05]. La survie du réseau est le principal critère de cette approche, qui propose de ne pas utiliser de façon permanente la route la plus économe en énergie, car elle draine l'énergie des noeuds le long de cette voie. Au lieu de cela, l'un des chemins multiples est utilisé avec une probabilité particulière, de sorte que toute la durée de vie du réseau est étendue. Le protocole suppose que chaque noeud soit adressable via une classe d'adresses qui inclut la localisation et les types de noeuds.

2.3.2 L'algorithme de routage "EARCBSN"

L'algorithme Energy-Aware Routing in Cluster-Based Sensor Networks (EARCBSN) [YYA02] est un algorithme de routage hiérarchique fondé sur une structure à trois niveaux. Les capteurs sont regroupés en clusters avant l'exploitation du réseau. Les chefs des grappes ("clusters-head"), dans l'algorithme, sont consacrés semblablement aux passerelles et ces chefs de grappes ("cluster-heads") ont plus d'énergie que les autres capteurs et savent où se trouvent tous les capteurs (leurs emplacements). Le routage requiert une maintenance de chef de grappe ("cluster-head") qui contient tous les paramètres qui affectent la décision de routage. Dans cet algorithme, ces paramètres sont : l'état de l'emplacement, l'énergie résiduelle et le mouvement des messages. Il y a une certaine imprécision dans le modèle de puissance des passerelles en raison de la surcharge, de la perte de paquets et de la propagation différée des messages [Ayy02, CE02]. Le noeud de passerelle effectue des actions pareilles à celles d'un gestionnaire du système de réseau central, il achemine les chemins pour les données de capteurs, contrôle le temps total d'accès au grappe ("cluster") et contrôle l'accès entre les capteurs. Le noeud passerelle suit la consommation d'énergie pour chaque noeud de capteurs et contrôle également les changements dans l'environnement. En outre, il permet la configuration de capteurs et le réseau efficacement pour prolonger la longévité du réseau.

2.3.3 L'algorithme de routage "GBR"

L'algorithme Gradient-Based Routing (GBR) [SS01] ou le routage par gradient est une version légèrement modifiée de la diffusion dirigée [AY05]. L'idée derrière ce protocole est de garder le nombre de sauts lorsque le paquet est transmis sur le réseau. Ainsi, chaque noeud peut détecter le nombre minimum de sauts vers la destination.

Ce nombre s'appelle hauteur du noeud. Le gradient sur un lien est la différence entre la hauteur d'un noeud et celle de son voisin. La transmission d'un paquet est effectuée sur un lien dont le gradient sur-il est plus grand. Le routage par gradient concerne l'utilisation de quelques techniques auxiliaires telles que l'agrégation des données pour équilibrer le trafic uniformément sur le réseau.

Pour gérer les données, trois techniques différentes ont été présentées :

- **Stochastic Scheme** : un noeud sélectionne arbitrairement un saut lorsque deux sauts ou plus ont le même gradient.
- **Energy-based scheme** : lorsque l'énergie d'un noeud est en dessous d'un certain seuil, il agrandit sa hauteur pour que les autres capteurs ne choisissent pas ce noeud pour envoyer leurs données.
- **Stream-based scheme** : l'idée est d'écarter les nouveaux flux à partir de noeuds qui font simultanément parti de la trajectoire des autres filières

Les données cherchent ensuite à obtenir une répartition égale du trafic sur l'ensemble du réseau, ce qui permet d'équilibrer la charge sur les noeuds de capteurs et d'augmenter la durée de vie du réseau. Les techniques utilisées dans l'équilibrage de charge et l'intégration de données s'appliquent également à d'autres protocoles de routage pour améliorer les performances.

2.4 Les algorithmes intelligents

Étant donné que les algorithmes intelligents sont beaucoup plus efficaces que les algorithmes traditionnels, en particulier dans les problèmes complexes et non linéaires, les algorithmes intelligents deviennent de plus en plus intéressants dans la conception de protocoles de réseaux de capteurs sans fil. De nombreux algorithmes intelligents ont été proposés ces dernières années. Cependant, compte tenu de leurs caractéristiques informatiques, tous les algorithmes intelligents ne peuvent pas être utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil. Dans ce rapport, nous passons en revue les articles de recherche au cours des dernières années et trouvons quelques algorithmes intelligents disponibles pour la conception de protocole de routage. Ces algorithmes intelligents comprennent le recuit simulé (SA) [MRR⁺53], l'algorithme génétique (GA) [Hol92], l'algorithme de colonie de fourmis (ACO) [DG97], l'optimisation par essais particuliers (PSO) [Ken11, SB98], logique floue (FL) [Zad65] et Réseau de neurones (NN) [MP43]. De plus, dans [KGV83], l'auteur introduit également le principe de SA. L'introduction détaillée de ces algorithmes intelligents dépasse le cadre de ce rapport et peut-être trouvée dans les références correspondantes.

2.4.1 Méthodes basées sur des algorithmes intelligents

Même si les méthodes cross-layer traditionnelles peuvent grandement améliorer les performances de routage, compte tenu de leur capacité limitée à gérer plusieurs contraintes et une complexité de calcul élevée, l'application large de la méthode cross-layer traditionnelle est limitée. étendre la plage d'application des méthodes de couches croisées. Les méthodes intelligentes basées sur des algorithmes pour la conception de protocoles de routage inter-couches constituent toujours un nouveau domaine de recherche pour les réseaux de capteurs acoustiques sous-marins. Au cours des dernières années, de nombreux chercheurs ont consacré leurs efforts à combiner la méthode traditionnelle de conception de couches croisées et les algorithmes intelligents afin de trouver une approche efficace pour la conception de protocoles de routage inter-couches. Il existe de nombreux excellents protocoles de routage basés sur des algorithmes intelligents qui ont été

proposés pour les réseaux de capteurs sans fil terrestre ; cependant, seuls les protocoles de routage basés sur la logique floue ont été appliqués dans les réseaux de capteurs acoustiques sous-marins. Par conséquent, l'examen de ces protocoles de routage de conception multi-couche basée sur des algorithmes intelligents devrait ouvrir nos esprits et fournir plus de méthodes de recherche pour la conception de protocoles de routage de réseau de capteurs acoustiques sous-marins.

2.4.1.1 Protocoles de routage logique flous

La logique floue est une sorte de science basée sur une logique à valeurs multiples. La logique floue utilise un ensemble flou pour représenter la pensée floue, le langage flou et les lois de contrôle floues. En 1965, le mathématicien Zadeh a d'abord proposé le principe des ensembles flous [Zad65]. L'essentiel des mathématiques floues et de la logique floue est de fournir des descripteurs de précision pour les objets flous. La logique floue utilise des méthodes mathématiques pour imiter les actions du cerveau humain, telles que le mode de raisonnement, l'analyse d'incertitude, etc. En utilisant des ensembles flous et des règles floues pour raisonner les limitations de transitivité ou les expériences qualitatives, les algorithmes de logique floue peuvent imiter le cerveau humain pour atteindre un jugement de logique floue et résoudre des problèmes qui ne peuvent pas être résolus par des méthodes traditionnelles. La logique floue est bonne pour traiter les problèmes dans lesquels les limites ne sont pas claires. De nombreux protocoles de routage de réseaux de capteurs sous-marins ont introduit des algorithmes de logique floue dans la conception du protocole [HWL⁺11, GDV14]. Dans [HWL⁺11], le protocole de routage à faible consommation d'énergie (PER) comprend deux modules : le sélecteur de noeud de transfert et le mécanisme de routage d'acheminement de l'arbre. Le sélecteur de noeud de transfert utilise un système d'inférence à logique floue et des arbres de décision pour choisir le noeud de relais du tronçon suivant. Trois paramètres sont utilisés comme entrées du système d'inférence à logique floue : la plage de transmission, l'angle d'inclusion et l'énergie résiduelle. Différents de [HWL⁺11], les algorithmes de [BB14, GDV14] sont des algorithmes de routage à logique floue basés sur des grappes ("clusters"). Dans [BB14], les auteurs proposent un algorithme de routage à logique floue basé sur les grappes ("clusters") avec une distribution de charge uniforme pour les réseaux à grande échelle. Cet algorithme est similaire à LEACH ; la différence est que ce protocole n'inclut pas la formation d'ordonnancement TDMA dans la phase d'installation initiale. Sur la base de ceux-ci, le protocole proposé peut prolonger la durée de vie du réseau de 40% à 50% en moyenne de plus que LEACH. Dans [GDV14], en tenant compte de l'énergie résiduelle, de la distance à l'enfoncement, de la densité des noeuds, de la charge et de la qualité du lien, les auteurs proposent un regroupement ("clustering") basé sur la logique floue et technique d'agrégation pour les réseaux de capteurs acoustiques sous-marins. Le travail dans [RRZ15] est un protocole de routage optimisé par logique floue basée sur la grille. Dans [RRZ15], le réseau est divisé en différentes grilles virtuelles. Chaque grille n'a qu'un seul noeud actif. Le système de logique floue est utilisé pour sélectionner le noeud actif. Dans [TLA⁺15], les auteurs utilisent la distance au puits, l'énergie résiduelle et la qualité de liaison des voisins potentiels proches du puits comme entrées du système de logique floue pour choisir le meilleur chemin de routage, qui a une performance énergétique plus équilibrée que les protocoles de routages traditionnels.

2.4.1.2 Recuit simulé basé

Le recuit simulé a été proposé par Metropolis en 1953 [MRR⁺53]. En 1983, le recuit simulé a été introduit dans l'optimisation combinatoire [KGV83]. Le recuit simulé est une sorte d'algorithme d'optimisation de recherche stochastique basé sur une stratégie de résolution itérative de Monte-Carlo. L'idée de recuit simulé est inspirée par la similitude entre le processus de recuit et l'optimisation combinatoire. Le recuit simulé commence par une température initiale élevée ; avec la diminution de la température, l'algorithme de recuit simulé utilise un saut probabiliste pour

trouver la solution optimale dans l'espace de solution de manière aléatoire, c'est-à-dire que l'algorithme peut sauter entre les solutions localement optimales de manière probabiliste et finalement obtenir une solution globalement optimale. L'algorithme de recuit simulé est un algorithme d'optimisation universel qui peut théoriquement atteindre une performance d'optimisation globale. L'algorithme de recuit simulé a été largement utilisé dans l'ingénierie de contrôle, l'apprentissage automatique, le réseau de neurones, le traitement du signal, etc. De nombreux chercheurs ont utilisé des algorithmes de recuit simulé pour améliorer les performances de LEACH, comme [HCB02, ZXL12]. L'algorithme présenté dans [HCB02] utilise un algorithme de recuit simulé pour former des groupes (ou grappes). Dans le regroupement ("clustering") centré adaptatif à faible énergie (LEACH-C) [HCB02], le problème NP-difficile de trouver k grappes ("clusters") optimaux a été résolu. Sur la base de LEACH-C, dans [SLG12], les auteurs proposent un algorithme LEACH-C optimisé pour l'efficacité énergétique pour les RCSFs ("WSNs"). Pour améliorer la performance énergétique, l'optimisation de l'efficacité énergétique LEACH-C prend en compte la retransmission et la reconnaissance des paquets pour créer un modèle de consommation d'énergie en tête de grappe ("cluster"). L'algorithme peut calculer la somme quadratique des distances de chaque tête de grappe à ses noeuds membres dans la solution optimale. Basé sur LEACH, dans [ZXL12], les auteurs utilisent les informations des noeuds membres en phase stationnaire pour choisir les têtes de grappes qui occuperont le rôle de têtes de grappes dans la période de phase régulière ultérieure pour éviter la mort prématurée des têtes de grappes. Le travail de [KM12] aborde le problème du déploiement de capteurs à haute efficacité énergétique. Dans cet algorithme, un algorithme de recuit simulé sera utilisé pour calculer le résultat de l'optimisation globale pour l'ensemble du réseau. Dans [HJK13], les auteurs conçoivent un algorithme de recuit simulé pour les réseaux de capteurs sans fil à grande échelle. Dans cet algorithme, l'indice de Wiener est utilisé comme coût de la solution. L'algorithme sélectionne aléatoirement un voisinage comme solution actuelle et calcule l'indice de Wiener. Si l'indice de Wiener est supérieur ou égal à la solution actuelle, la solution actuelle sera remplacée par le voisinage. L'algorithme a une meilleure efficacité énergétique et des performances de latence réseau.

2.4.1.3 Approches basées sur l'algorithme génétique

L'algorithme génétique, proposé par Holland en 1975 [Hol92], est motivé par la théorie de l'évolution biologique. Pour le processus de l'évolution biologique dans le monde naturel, les êtres vivants peuvent s'adapter à l'environnement changeant selon la mutation de sélection naturelle et l'évolution génétique. Sur cette base, les chercheurs utilisent l'évolution biologique pour simuler le processus de recherche et d'optimisation. Dans les algorithmes génétiques, les points de l'espace de recherche sont utilisés pour représenter le point, les fonctions de l'objet représentent la capacité des individus biologiques à s'adapter à l'environnement, et le processus de bonne solution remplaçant les mauvaises solutions dans l'optimisation et la recherche représente le processus de survie du plus apte. L'algorithme peut sélectionner des individus sur la base d'une valeur de fitness dans l'espace de recherche et utiliser la théorie de l'évolution biologique pour générer une nouvelle population qui représente les nouvelles solutions de recherche. Ce processus est similaire à l'évolution biologique, dans laquelle les populations rejetons sont beaucoup mieux que la génération précédente en s'adaptant à leur environnement. Cette propriété peut être utilisée dans d'autres domaines de recherche pour trouver des solutions optimales approximatives.

Comme proposé dans le protocole de routage inspiré de l'algorithme génétique (GAOUP) [CMN11], l'algorithme génétique et le recuit simulé sont utilisés pour améliorer les performances du réseau. Le GAOUP présente de grands avantages en termes de temps de développement. De plus, les systèmes sont robustes et relativement insensibles au bruit. Dans [BK12], pour augmenter la période stable dans les protocoles de routage en grappe ("cluster"), le protocole de routage en grappe ("cluster") (ERP) basé sur l'évolution utilise une population d'individus qui

évoluent vers le maintien d'un nombre optimal de grappes("clusters"). La sélection de tournoi binaire est utilisée dans cet algorithme ; le processus de sélection choisit les individus candidats parmi la population de la génération actuelle en fonction de leur valeur de formes physiques. Même si l'ERP peut prolonger la durée de vie du réseau et réduire la consommation d'énergie, mais la performance de sensibilisation à la stabilité est faible. Le protocole introduit dans [MN12] est utilisé pour résoudre le problème du routage de chemin le plus court. L'algorithme utilise l'algorithme génétique pour sélectionner la meilleure route à partir d'un ensemble de routes aléatoires en fonction des valeurs de fitness de chaque route. Dans [YCCV11], les auteurs ont proposé un protocole de routage multidiffusion ("multicast") multi-contraintes basé sur un algorithme génétique qui détermine les routes de multidiffusion quasi-optimales à la demande. Basé sur l'approche de l'algorithme génétique multi-contrainte, le protocole de routage proposé peut optimiser plusieurs paramètres de QoS simultanément.

2.4.1.4 Méthodes basées sur l'optimisation par essaim de particules

L'optimisation par essaim de particules est une sorte d'algorithmes basés sur l'intelligence de l'essaim qui a été proposé par Kennedy et Eberhart en 1995 [Ken11]. L'optimisation par essaims particulaires est inspirée du comportement de recherche de nourriture des oiseaux. Dans l'optimisation par essaim de particules, chaque solution d'optimisation est un oiseau dans l'espace de recherche, appelé particule. Chaque particule a une valeur de fitness déterminée par la fonction optimale. Le vecteur de vitesse détermine la direction et la distance de la particule. Ensuite, les autres particules suivront la particule optimale pour rechercher une solution optimale dans l'espace de la solution. L'initialisation de l'optimisation par essaim de particules est un ensemble de solutions aléatoires ; alors l'algorithme trouvera la solution optimale par itération. Dans chaque cycle d'itération, la particule se met à jour en suivant deux extremums. Le premier extremum est la solution optimale qui est trouvée par une particule appelée meilleure privée. Un autre extremum est la solution optimale actuelle pour l'essaim entier, qui est le meilleur global. Au cours des dernières années, l'algorithme PSO a été largement utilisé dans l'optimisation des fonctions, la formation de réseaux neuronaux, le contrôle de la logique floue, ou tout autre domaine de recherche dans lequel des algorithmes génétiques peuvent être utilisés. Les auteurs de [EY15] utilisent un algorithme d'essaim de particules à deux niveaux pour configurer un réseau afin d'obtenir une consommation d'énergie et une performance de débit de paquets optimales. Une technique hybride est proposée dans [LT14], qui intègre à la fois l'algorithme PSO et l'algorithme GA. Dans cet algorithme, la contrainte HC (Hybridization Coefficient) est utilisée pour exprimer le pourcentage de population. Lorsque HC est égal à zéro, cela signifie que la procédure est un algorithme PSO ; quand HC est 1, cela signifie que la procédure est un algorithme GA. Un protocole de routage et de clustering basé sur PSO a été proposé dans [KJ14]. Dans cet algorithme, la passerelle recueille des informations à partir des noeuds et envoie les informations à une station de base. Une fois que la station de base reçoit les informations des passerelles, elle exécute des algorithmes de routage et de mise en grappe("cluster") basés sur PSO pour former des grappes("clusters"). Dans [ST12], l'algorithme PSO sera utilisé pour juger les différents chemins et choisir le meilleur chemin optimisé en fonction de la valeur de fitness. La valeur de fitness représente la consommation d'énergie dans cet algorithme. La méthode de récupération par routage basé sur l'optimisation des essaims coopératifs endocriniens (ECPSOA) est proposée dans [HDR⁺15]. En ECPSOA, la stratégie multi-essaim guide les particules dans de meilleures directions et le mécanisme endocrinien fournit une grande diversité de particules pour augmenter l'espace de recherche, ce qui peut sortir de l'optimisation locale et améliorer la capacité de recherche.

2.4.1.5 Méthodes basées sur le réseau neuronal

Le concept de réseau de neurones artificiels (NN), proposé dans les années 1940 [MP43], est constitué d'une grande quantité de neurones qui ont des poids accordables. Le NN présente certains avantages tels qu'un traitement parallèle à grande échelle, le stockage distribué, l'auto-organisation, l'auto-apprentissage, etc. La fonction et la structure des neurones signaux sont simples, mais le système constitué d'une grande quantité de neurones est complexe. Le NN peut représenter les caractéristiques de base du cerveau humain. Comparé à un ordinateur numérique, le NN est beaucoup plus proche de la structure et de la fonction du cerveau humain. Le NN ne calcule pas étape par étape sur la base d'un programme spécifique; il peut s'adapter à un environnement en évolution et résumer les règles pour réaliser des fonctions spécifiques. La première étape d'un NN est l'apprentissage, qui est basé sur des critères. Un de ces critères est que si le réseau prend une mauvaise décision, la probabilité dont il fait la même erreur à l'avenir devrait être réduite. Par conséquent, en général, plus le nombre de neurones dans le réseau est élevé, plus les performances sont meilleures. Dans [BLMB06], chaque noeud utilise le réseau neuronal pour gérer le routage vers un noeud récepteur. Les noeuds utilisent la latence, le débit, le taux d'erreur et le rapport cyclique pour choisir le meilleur noeud relais du prochain bond. Sur la base des protocoles de routage d'état de liaison et d'un réseau de neurones, dans [KRR12], les noeuds utilisent le nombre de sauts, la bande passante, la charge et le délai de propagation pour créer des métriques. Les métriques utilisent un réseau de neurones pour optimiser la sélection de routage et l'occupation des ressources réseau. Comme dans un réseau ad-Hoc mobile, le routage par trajets multiples peut grandement améliorer la fiabilité du réseau. Dans [SH12], chaque noeud du réseau sera équipé d'un réseau de neurones et pourra être formé et utilisé pour sélectionner des chemins disjoints optimaux, optimaux et sous-optimaux, qui peuvent améliorer remarquablement la fiabilité du réseau.

2.4.1.6 Méthodes basées sur l'apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement (RL) a été proposé par Kaelbling et al. En 1996 [KLM96], et Sutton et Barto en 1998 [SB98], respectivement. RL est un sous-domaine de l'apprentissage automatique. RL utilise un programme informatique pour générer des modèles ou des règles à partir d'un grand ensemble de données. RL est inspiré par l'apprentissage des animaux. Dans l'apprentissage par renforcement, si la stratégie de comportement a un effet positif sur l'environnement, alors l'agent renforcera cette stratégie de comportement à l'avenir. L'objectif est de trouver la stratégie d'optimisation dans chaque état discret et de résumer la récompense maximale. RL considère l'apprentissage comme un processus d'exploration. L'agent choisit une action pour agir sur l'environnement et l'environnement change en fonction de l'action. Pendant ce temps, l'environnement générera un signal de renforcement pour l'agent. L'agent choisit l'action suivante en fonction de l'environnement et du signal de renforcement. Le principe de la sélection des actions est de maximiser la probabilité de récompense positive. L'action peut non seulement affecter la valeur du signal de renforcement, mais aussi l'état de l'environnement. En RL, le signal de renforcement est juste une évaluation de l'action de l'agent. Du fait que l'environnement ne peut fournir que peu d'informations, l'agent doit pouvoir s'appuyer sur sa propre expérience. Basé sur cette méthode, l'agent peut apprendre des connaissances de l'action et modifier la stratégie d'action pour s'adapter à l'environnement. Dans [HF10], basés sur le concept d'apprentissage automatique, les auteurs ont proposé un protocole de routage à extension énergétique et à durée de vie étendue. Dans [HF10], les noeuds calculent les valeurs de Q de leurs voisins et choisissent les voisins ayant la valeur Q la plus élevée en tant que redirecteurs de saut suivant. En utilisant la technique RL, ce protocole peut effectivement adapter la topologie dynamique du réseau. Comme [HF10], dans [KAZ⁺15], les noeuds choisissent les noeuds du relais du prochain saut en fonction de l'ID du noeud et de la valeur de Q . Les voisins dont l'ID

est le même que le noeud source et la valeur Q est la plus élevée parmi les noeuds voisins seront choisis comme noeuds relais. Le travail dans [OMPL12] utilise l'apprentissage par renforcement pour fournir un protocole de routage résiliant la défaillance de lien proactif pour les réseaux MANET (Mobile Ad-Hoc Networks). Dans [MCB13], les noeuds d'un groupe de noeuds coopératifs seront considérés comme des adversaires l'un de l'autre ; par conséquent, chaque noeud maintiendra une valeur Q qui reflète le gain qui aurait été reçu si ce noeud sélectionne une action et que les autres noeuds ont conjointement sélectionné l'autre action. Après cela, le noeud ayant le gain total le plus élevé sera choisi pour transmettre le paquet de données au prochain groupe de noeuds coopératifs vers le noeud puits. Plus de protocoles de routage basés sur l'apprentissage par renforcement peuvent être trouvés dans [RC13, JM14].

2.4.1.7 Méthodes basées sur l'optimisation des colonies de fourmis

L'algorithme de colonie de fourmis a été proposé par Coloni et Dorigo dans les années 1990 [DG97]. Cet algorithme est inspiré du comportement des colonies de fourmis. Les chercheurs ont découvert que les fourmis communiquent entre elles grâce à une sorte de produits chimiques appelée phéromone. Les fourmis peuvent laisser des phéromones dans le chemin qu'elles traversent et percevoir la phéromone pendant leurs mouvements. La phéromone peut guider le mouvement des fourmis, de sorte que les comportements collectifs des algorithmes de colonies de fourmis se composent d'une grande quantité de fourmis. Le phénomène peut fournir une rétroaction positive à l'algorithme pour améliorer le processus de sélection de routage. Par conséquent, une fois que plusieurs fourmis ont passé une route, la probabilité que cette route sera choisie par d'autres fourmis est élevée. Les fourmis peuvent utiliser ce type d'échange d'informations pour trouver de la nourriture. Basé sur cette méthode, l'algorithme de colonie de fourmis peut atteindre l'optimisation globale. L'algorithme de colonie de fourmis peut être utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire telle que l'asymétrie de problème du voyageur de commerce, acheminement de véhicule, routage WSN, etc. Il existe de nombreuses recherches qui utilisent les algorithmes de colonies de fourmis pour améliorer les performances de routage des réseaux de capteurs sans fil, comme dans [MHHG12, LLH13]. Dans [MHHG12], l'algorithme de colonie de fourmis fonctionne avec la LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) pour choisir le meilleur noeud de relais du prochain bond. Dans [WCS⁺12], l'algorithme AFSA (Artificial Fish Swarm Algorithm) trouve un chemin de routage optimal candidat et l'algorithme ACOA (algorithme d'optimisation des colonies de fourmis) aide l'algorithme AFSA à calibrer ce chemin de routage. Des algorithmes similaires peuvent être trouvés dans [MDO⁺10, LLH13] ; dans ces algorithmes, les algorithmes de colonies de fourmis sont utilisés indépendamment ou combinés avec d'autres algorithmes intelligents pour sélectionner le meilleur routage ou la meilleure tête de grappe ("cluster") du réseau.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis l'accent sur les principaux protocoles de routage dans les réseaux de capteurs. Nous avons résumé les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs et nous avons classé les approches en trois catégories principales : les protocoles hiérarchiques, les protocoles basés sur la localisation et les protocoles data-centric. Enfin, nous nous sommes concentrés sur les protocoles de routage qui s'intéressent à la consommation d'énergie. Aussi, nous avons présenté sept différents types de protocoles de routage basés sur des algorithmes intelligents. Grâce à l'intelligence de l'algorithme intelligent, ces protocoles de routage sont plus efficaces et robustes que les protocoles de routages traditionnels ; de plus, ils ont la capacité de gérer les multiples contraintes d'un réseau. Les algorithmes intelligents basés sur l'apprentissage tels que le FL, le NN, le RL et la colonie de fourmis ont de bonnes performances dans le routage

de découverte et de construction du routage ; la SA, l'AG, et les PSO sont des algorithmes intelligents similaires qui sont principalement utilisés pour former des clusters ou choisir une tête de grappe ("cluster") pour le réseau. Les applications et la recherche sur les algorithmes intelligents dans les réseaux de capteurs ne font que commencer ; beaucoup d'excellents algorithmes intelligents n'ont pas encore été implémentés. Par conséquent, il s'agit d'un domaine de recherche très prometteur pour la conception de protocoles de routage de réseaux de capteurs et nous anticipons de nombreux problèmes et défis en suspens.

**SOLUTIONS PROPOSÉES POUR AUGMENTER LA DURÉE DE VIE DES
RCSFS MULTI-SAUTS**

3.1	Introduction	38
3.2	La topologie basée sur le théorème de Pythagore généralisé	38
3.2.1	Introduction	38
3.2.2	Topologie et wsn dans l'état de l'art	39
3.2.3	Topologie proposée	40
3.2.4	Évaluation des performances	46
3.2.5	Conclusion	46
3.3	Trois méthodes de routage statique multi-sauts	46
3.3.1	Introduction	46
3.3.2	Topologie proposée	47
3.3.3	Résultats de la simulation	50
3.3.4	Conclusion	54
3.4	Conclusion	54

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons voir deux solutions proposées pour augmenter la durée de vie de réseaux de capteurs sans fil multi-sauts, la première se base sur le théorème de Pythagore généralisé pour la sélection de nouveau noeud saut dans un réseau aléatoire avec un routage dynamique utilisant un algorithme de sélection de noeud suivant. Alors que la deuxième s'intéresse au réseau où les noeuds sont positionnés dans certains endroits avec un routage statique celle-ci propose et compare entre ces trois méthodes de routage proposées.

3.2 La topologie basée sur le théorème de Pythagore généralisé

Sujet de topologie a acquis un intérêt supplémentaire et spécial dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil (WSN). Alors que les déploiements WSN sont généralement optimisés par la topologie réseau fondamentale connue, une autre tendance consiste à améliorer WSN en gérant la topologie du réseau. De nombreuses propositions ont été testés dans ce domaine, telles que le routage dirigé vers la topologie, les schémas coopératifs, le contrôle de topologie basé sur la couverture de capteurs et le contrôle de topologie basé sur la connectivité réseau. La plupart des systèmes se sont avérés capables de fournir de meilleures performances de surveillance et de communication réseau avec une durée de vie réseau accrue. L'objectif principal de cette section est d'introduire et d'évaluer une topologie simple WSN qui minimise la consommation d'énergie. La topologie proposée est basée sur l'utilisation du théorème de Pythagore généralisé. Pour évaluer la topologie proposée pour la minimisation de l'achèvement énergétique, un ensemble de simulation utilisant Matlab est fourni pour mesurer la durée de vie du réseau et l'énergie consommée par les noeuds. Les résultats de la simulation montrent l'efficacité de notre topologie proposée.

3.2.1 Introduction

Les progrès actuels dans les domaines de la technologie électromagnétique et électronique, des systèmes sans fil et du traitement numérique des signaux ont permis la mise au point de noeuds de capteurs peu coûteux, peu énergivores et polyvalents [ASSC02b]. Conjointement sans fil en réseau ces noeuds de manière ad-Hoc, ils forment un réseau de capteurs sans fil. Les noeuds rencontrent les données via leurs capteurs, les traitent à proximité et transmettent les informations à un collecteur de données tel que la station de base (la figure 1.1). En raison de la matrice de transmission restreinte du noeud, cette transmission est fréquemment utilisée [SS01]. Un noeud dans le réseau a essentiellement deux tâches diverses :

- (1) mesurer les variations de son site et traiter l'information et
- (2) rediriger le trafic comme un relais de transition dans le corridor multi-sauts.

Les applications de tels réseaux de capteurs comprennent la surveillance écologique en forêt, la variation des conditions climatiques dans les immeubles de bureaux ; commande de robot et des conseils dans des environnements de fabrications automatiques ; inventaire d'entrepôt ; surveillance intégrée des patients, diagnostics et suivi et localisation de la santé du corps. Les réseaux de capteurs sans fil sont la famille de réseaux qui sont créés avec un ensemble de petites machines équipées de capteurs dispersés dans l'environnement d'intérêt. Ces petites machines sont utilisées pour quantifier et enregistrer diverses conditions environnementales dans divers endroits. Un réseau de capteurs est constitué de noeuds capteurs, où chaque noeud capteur est formé par un émetteur-récepteur radio unitaire avec une antenne, un micro-contrôleur ou DSP, un circuit électronique d'interfaçage et une source d'énergie (habituellement une batterie). Chaque noeud de capteur est susceptible d'être une petite machine constituée d'une unité de traitement et d'une quantité limitée de puissance de calcul et de mémoire. La partie critique dans

ces machines est l'unité de puissance et sa durée de vie. La compréhension de la consommation électrique est particulièrement critique pour les réseaux de capteurs fonctionnant sur des réserves de puissance limitées, telles que les batteries ou les cellules solaires dans le cas d'une forêt, région désertique. Les concepteurs de réseaux de capteurs doivent avoir la possibilité d'obtenir des formulaires de dépenses d'énergies précises et fiables pour ajuster leurs objectifs avant de les déployer dans des conditions réalistes. En dehors de la consommation totale d'énergie dans le temps, il est important de tenir compte de la topologie du réseau de modèles, car cela influe sur la capacité de la source d'énergie à fournir une énergie adéquate dans le temps. Ces défis étaient apparents dans le [Kac09], dans lequel les noeuds dans une topologie adéquate peuvent augmenter significativement leur durée de vie prévue. Dans ce travail, nous sommes intéressés à évaluer la composition énergétique et l'impact de la topologie utilisée. La topologie utilisée est inspirée du théorème de Pythagore généralisé. Le reste de cette section est organisé comme suit : la sous-section 3.2.2 passe en revue les topologies principales dans le domaine des RCSFs ainsi que les paramètres utilisés pour l'évaluation de l'efficacité. La sous-section 3.2.3 présente les topologies proposées et leur validation. La sous-section 3.2.4 présente l'évaluation des performances des topologies proposées et quelques analyses connexes. La sous-section 3.2.5 conclut la section.

3.2.2 Topologie et RCSF dans l'état de l'art

Dans la littérature, il y a beaucoup de topologies proposées pour servir un RCSF, dans cette section nous en présenterons le principal. Nous pouvons diviser la topologie utilisée dans le champ WSN en deux classes : la première est un routage géographique et les problèmes de trous de capteurs basés et la seconde concerne la connectivité et couverture du capteur. La première famille de topologies utilise les informations géographiques et topologiques du réseau pour atteindre les meilleurs schémas de routage avec une efficacité de routage élevée et une consommation d'énergie minimale. Différents trous de capteurs, tels que des trous de brouillage, des trous noirs/puits et des trous de vis (warmholes), peuvent se former dans un réseau WSN et créer des variations de topologie de réseau qui perturbent les applications de la couche supérieure. Par exemple, une communication intense peut provoquer des trous de brouillage qui ne parviennent pas à envoyer un message aux noeuds extérieurs. Les trous "noirs/puits" et les trous de vis sont causés par des noeuds épuisés autour d'un noeud puits ou de faux puits ou par des noeuds malveillants. Si les problèmes de trous de capteur ne sont pas traités avec soin, ils créeront une table de routage coûteuse et épuiseront rapidement les noeuds intermédiaires. Les problèmes de contrôle de la topologie peuvent être subdivisés en deux catégories : la topologie de la couverture du capteur et la topologie de la connectivité du capteur. La topologie de couverture décrit la topologie de la couverture du capteur et se préoccupe de la façon de maximiser une zone de détection fiable tout en consommant moins d'énergie. D'autre part, la topologie de connectivité concerne davantage la connectivité réseau et met l'accent sur la récupération et la distribution des messages dans le réseau. Deux types de mécanismes ont été utilisés pour maintenir une topologie de connectivité de capteur efficace : les mécanismes de contrôle de puissance et les mécanismes de gestion de puissance. Le premier contrôle le niveau de puissance radio pour obtenir une topologie de connectivité optimisée et le dernier maintient un bon horaire de veille/sommeil. Pour évaluer l'efficacité d'une topologie donnée, les paramètres utilisés sont : portée et couverture : la portée et la couverture sont presque certainement les nécessités principalement perceptibles pour un préliminaire (RCSF) de la plage de noeud à un gain de puissance d'émission / d'antenne et un débit de données. Les principaux facteurs affectant la portée d'un réseau sans fil sont la qualité de la couche physique et l'efficacité de la transmission de données à travers le réseau. Les exigences de couverture sont l'élimination des points morts dans le réseau et l'étendue de la zone de couverture dans la gamme, qui sont étroitement liés à la portée. L'évolutivité est la propriété de pouvoir faire face à des cellules réseau aussi petites de quelques noeuds à des

cellules de milliers ou même des dizaines de milliers de noeuds et d'augmenter la taille du réseau existant par ordre de grandeur sans utiliser de communication cellulaire coûteuse ou d'autres solutions à longue portée. Nombre de transmissions attendues ($E_{t(x)}$) : il prend en compte la perte de données due aux conflits d'accès au support et aux dangers environnementaux et prend en compte le nombre de transmissions nécessaires pour transmettre avec succès un paquet sur une liaison. Comptage des sauts : le nombre de sauts est la métrique la plus couramment utilisée dans les réseaux sans fil multi-sauts. Le chemin ayant le nombre minimum de liens entre une source donnée et le noeud de destination est sélectionné. Consommation d'énergie/Longévité du réseau : dans la plupart des protocoles de communication publiés pour les RCSFs, l'extension de la durée de vie du réseau a été mentionnée comme un objectif d'optimisation important. La position des noeuds peut affecter considérablement la durée de vie du réseau. Par exemple, une distribution de noeuds non-uniforme dans une zone donnée peut entraîner des goulots d'étranglement et un trafic déséquilibré. D'autre part, une distribution uniforme des noeuds dans un réseau peut entraîner une diminution de l'énergie des noeuds qui sont proches de la station de base à un débit supérieur à celui des autres noeuds, ce qui raccourcira la durée de vie du réseau.

3.2.3 Topologie proposée

Dans cette sous-section, nous traiterons la méthode utilisée pour optimiser l'efficacité de transmission entre trois noeuds, à des positions différentes, puis nous généraliserons pour tous les réseaux, quelle que soit leur taille. Dans cette sous-section, nous traiterons la méthode utilisée pour optimiser l'efficacité de transmission entre trois noeuds, à des positions différentes, puis nous généraliserons pour tous les réseaux, quelle que soit leur taille.

3.2.3.1 Formulation du problème

Le principe est que les capteurs ont deux possibilités pour transmettre l'information d'un noeud à l'autre, en choisissant : la transmission directe ou la transmission indirecte en utilisant un autre noeud comme relais de transition. Pour la suite, nous nous référerons à la distance entre le noeud 'x' et le noeud 'y' par $d_{(x,y)}$. Nous avons trois noeuds a, b et c, la distance $d_{(b,c)}$ entre le noeud b et le noeud c diffère selon l'angle γ , la figure 3.1 et la figure 3.2 ci-dessous montrent la différence. Nous avons par le théorème de Pythagore généralisé :

$$(d_{(b,c)})^2 = (d_{(b,a)})^2 + (d_{(a,c)})^2 - 2.d_{(b,a)}.d_{(a,c)}.cos(\gamma) \tag{3.1}$$

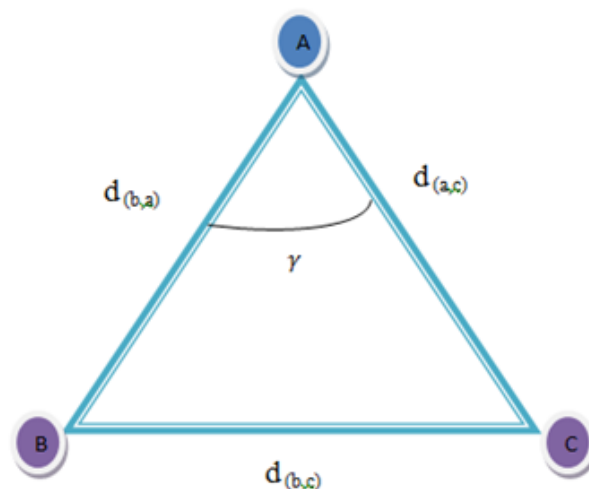
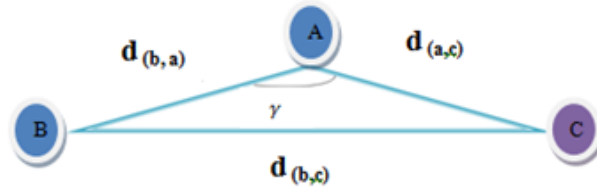


FIGURE 3.1 – Trois noeuds positionnés dans l'espace avec $0 \leq \gamma \leq \frac{\pi}{2}$

FIGURE 3.2 – Trois nœuds positionnés dans l'espace avec $\frac{\pi}{2} < \gamma < \pi$

Les nœuds de RCSF envoient leurs positions dans un petit message à la station de base. Dans notre travail, nous utilisons le mode d'énergie et l'analyse présentée dans [Ila01] et [Wol02]. Le modèle de dissipation d'énergie radio est illustré à la figure 3.3. Sur cette figure, $E_{t(x)}(k, d)$ présente l'énergie dépensée pour transmettre k bits sur une distance d , et E_{Rx} est l'énergie dépensée pour traiter un message k bits. Le paramètre E_{elec} indique l'énergie par bit dissipée pour faire fonctionner les circuits émetteur et récepteur. Ce paramètre dépend de nombreux facteurs tels que

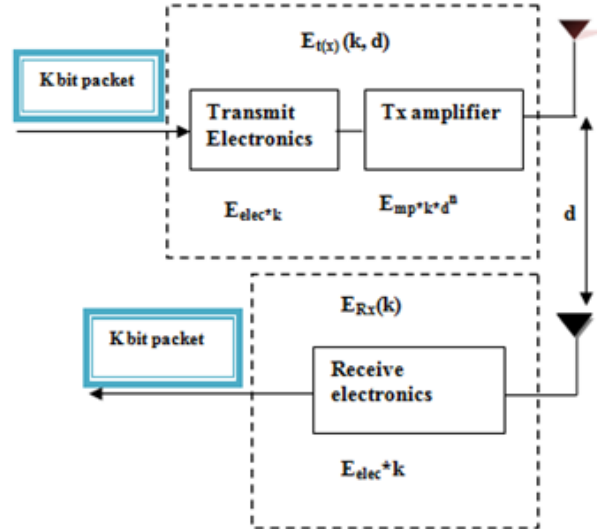


FIGURE 3.3 – Modèle de dissipation d'énergie radioélectrique [HCB02].

le codage numérique, la modulation, le filtrage et la propagation du signal [Wol02]. L'énergie dépensée par l'émetteur radio est donnée par l'équation 3.2 et celle dépensée par le récepteur est donnée par l'équation 3.3.

$$E_{t(x)}(k, d) = \begin{cases} k \cdot E_{elec} + k \cdot E_{fs} \cdot d^2 & \text{si } d < d_0; \\ k \cdot E_{elec} + k \cdot E_{mp} \cdot d^4 & \text{si } d \geq d_0. \end{cases} \quad (3.2)$$

$$E_{Rx} = k \cdot E_{elec} \quad (3.3)$$

Où : E_{fs} et E_{mp} présentent l'énergie de l'amplificateur respectivement dans un modèle d'espace libre (avec une perte de puissance d^2) et dans un modèle de canal d'évanouissement par trajets multiples (avec une perte de puissance d^4). Ils dépendent de "d", où "d" est la distance entre l'émetteur et le récepteur. Si la distance "d" est inférieure à un seuil, alors le modèle d'espace libre est utilisé ; sinon, le modèle à trajets multiples est utilisé. La valeur du seuil a été donnée par Heinzelman et al. Dans [Wol02]. Il est défini comme suit :

$$d_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{mp}}} \quad (3.4)$$

En utilisant l'équation 3.1, la figure 3.1 et la figure 3.2, nous pouvons conclure et définir :

$$\begin{cases} (d_{(b,c)})^2 > (d_{(b,a)})^2 + (d_{(a,c)})^2 & \text{si } \frac{\pi}{2} < \gamma < \pi; \\ (d_{(b,c)})^2 < (d_{(b,a)})^2 + (d_{(a,c)})^2 & \text{si } 0 \leq \gamma \leq \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (3.5)$$

$$(d_{(b,c)})^4 > (d_{(b,a)})^4 + (d_{(a,c)})^4 \quad \text{si } \frac{\pi}{2} < \gamma < \pi. \quad (3.6)$$

En utilisant les équations 3.2, 3.5 et 3.6, nous pouvons dire : si $0 \leq \gamma \leq \frac{\pi}{2}$, le noeud "b" transmet directement au noeud "c", mais si $\frac{\pi}{2} < \gamma < \pi$ il transmet d'abord l'information à un relais de transition "a" qui à son tour le transmet au noeud "c".

3.2.3.2 L'approche proposée

Ainsi, si un noeud a besoin de transmettre une donnée au récepteur et que le récepteur n'est pas dans son choix de transmission, alors le noeud source doit transmettre les données au noeud de saut. Par conséquent, le noeud source diffusera un message de requête. Chaque noeud voisin qui reçoit un message de requête d'une source stockera initialement l'ID source dans sa liste de voisins et diffusera sa propre puissance(énergie) et son propre identifiant de récepteur et son (x, y) comme réponse, puis attendra un accusé de réception, après que le noeud a une liste de ses voisins, il exécute cet algorithme pour choisir son meilleur voisin pour le saut suivant.

Algorithme 1 : Algorithme basé sur TPG pour trier le meilleur voisin

```

1 Initialisation : une liste  $L$  contient  $\{ ID_{voisin}, voisin_{(x,y)} \text{ et } voisin_{nergie} \}$ 
2  $n$  : nombre de noeuds voisins,
3  $d_1$  : distance entre le noeud ( $i$ ) et le puits,
4  $d_2$  : distance entre le noeud ( $i$ ) et son noeud voisin ( $j$ ),
5  $d_3$  : distance entre le noeud ( $j$ ) et le puits,
6  $i$  : noeud ( $i$ ),
7  $j$  : noeud voisin du noeud ( $i$ ),
8  $Min$  : variable.
9  $Next(i) = \text{puits}$ ;
10 Calculer  $d_1$ ;
11  $Min(i) = d_1$ ;
12 for  $j=1 : n$  do
13     Calculer  $d_2$ ;
14     Calculer  $d_3$ ;
15     Calculer  $\cosinus(\gamma) = \frac{(d_2)^2 + (d_3)^2 - (d_1)^2}{2 * d_3 * d_2}$ 
16      $\gamma = \arccosinus(\cosinus(\gamma))$ 
17     if  $\frac{\pi}{2} < \gamma < \pi$  then
18         if  $d_2 < Min(i)$  then
19              $Min(i) = d_2$ ;
20              $Next(i) = j$ ;
21         else
22             end
23     else
24         end
25 end

```

Chaque noeud transmet ses données à son voisin défini dans l'algorithme 1 mais si un capteur est mort : son énergie résiduelle $energy_{seuil}$, donc ses prédécesseurs essaient de trouver leurs

TABLE 3.1 – Caractéristiques radio utilisées dans nos simulations

paramètre	valeur
E_{elec}	50 nJ/bit
E_{fs}	10 pJ/bit/ m^2
E_{mp}	0.0013 pJ/bit/ m^4
E_0	0.5 J
K	4000 bits

successeurs en utilisant à nouveau l'algorithme 1 pour trier le meilleur voisin pour le saut suivant. Où :

- $energy_{seuil} = (E_{Tx}(k, Min(i)) + E_{Rx}.nb$ et
- nb : nombre de ses prédécesseurs

3.2.3.3 Validation de l'approche

Toutes les simulations sont basées sur le protocole suivant. Nous considérons de nombreux réseaux de capteurs sans fil avec $N = 100$ noeuds dispersés de façon aléatoire sur une surface de $100 * 100 m^2$. La station de base est située à S ($x = 40, y = 70$). De plus, nous ignorons l'effet provoqué par la collision de signal et l'interférence dans le canal sans fil. Puisque les noeuds ont une énergie limitée, ils consomment leurs énergies au cours des simulations. Une fois qu'un noeud est à court d'énergie, il est considéré comme mort et ne peut pas transmettre ou recevoir de données. Pour ces simulations, l'énergie diminue chaque fois qu'un noeud transmet ou reçoit des données et chaque fois qu'il effectue une agrégation de données en utilisant les paramètres radio indiqués dans le tableau 3.1.

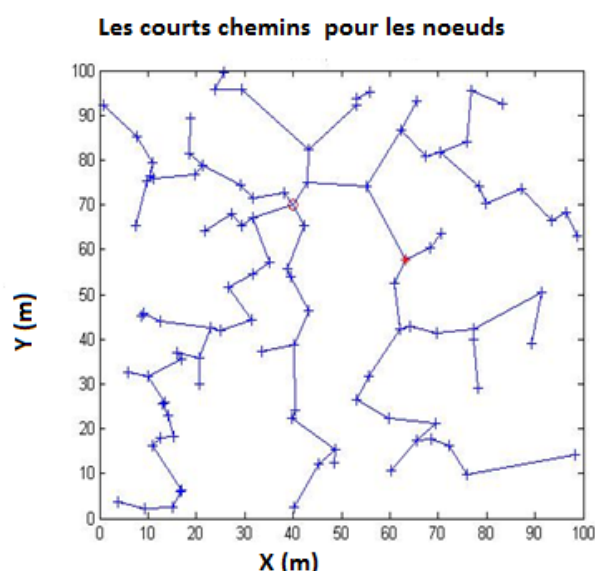


FIGURE 3.4 – Plus court chemin des noeuds lorsque le premier noeud est mort

Dans ces figures 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7 montrent le chemin entre tous les noeuds et le puits, chaque noeud choisit le plus proche voisin qui remplit certaines conditions :

- L'angle entre eux et le puits(SB) est supérieur à $\frac{\pi}{2}$ et
- La distance entre eux est minimale

- Son énergie résiduelle est supérieure à un seuil.

Si un noeud est mort (Les noeuds morts sont illustrés par des points rouges sur les figures 3.4, 3.5 et 3.6) le réseau s'adapte à la nouvelle situation, tous les prédécesseurs du noeud mort cherchent leurs nouveaux successeurs.

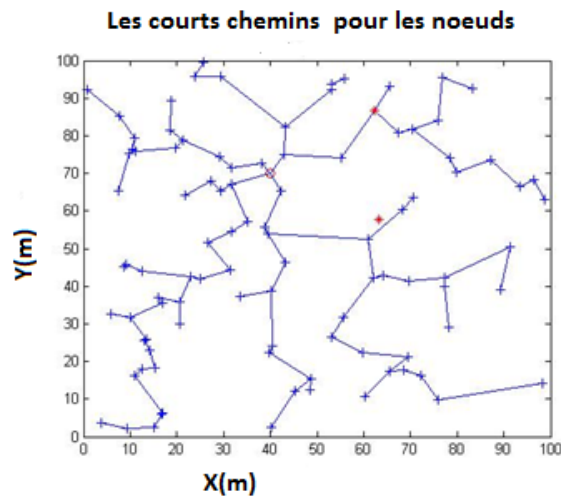


FIGURE 3.5 – Noeuds morts sont ignorés dans le réseau et les prédécesseurs de morts noeuds ont choisi leurs nouveaux successeurs

Dans la figure 3.5, nous voyons la première adaptation du réseau à la nouvelle situation, le noeud mort est coloré en rouge et ses prédécesseurs ont choisi leurs nouveaux successeurs.

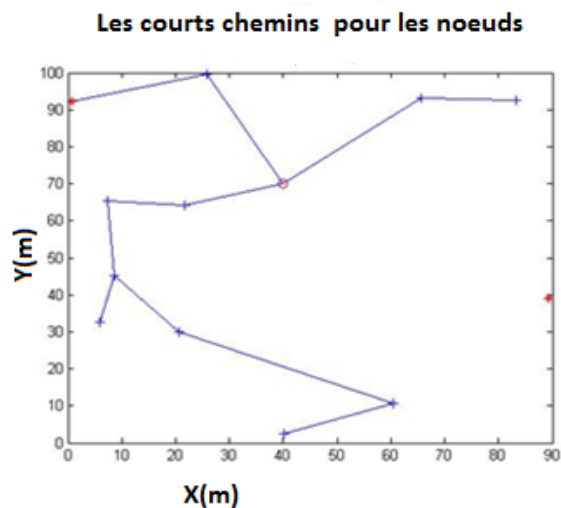


FIGURE 3.6 – Plus court chemin des noeuds au puits, après 1200 itérations

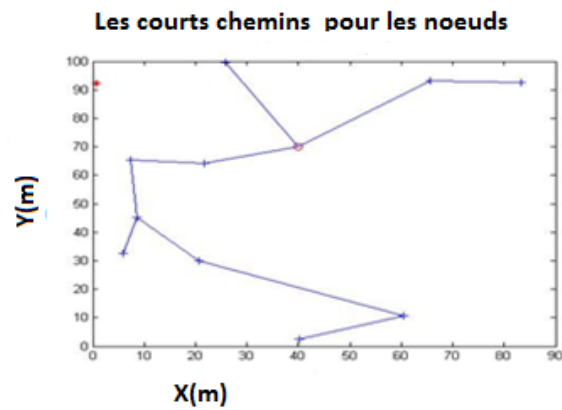


FIGURE 3.7 – Plus court chemin des noeuds au puits, après 1230 itérations, encore une fois, un autre noeud est mort

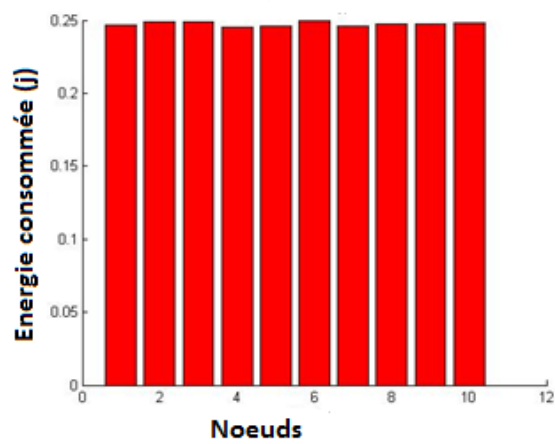


FIGURE 3.8 – Énergie totale consommée pour chaque 10 noeuds encore en vie

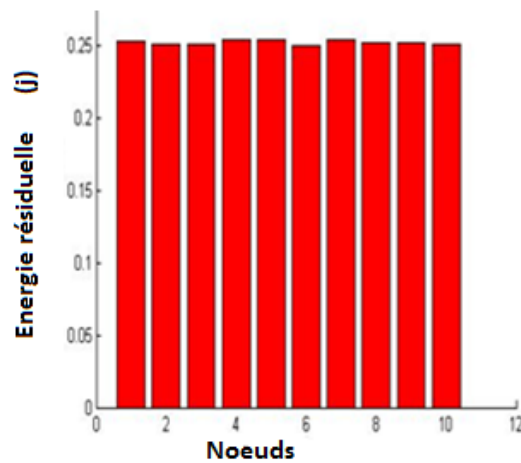


FIGURE 3.9 – Énergie résiduelle pour chaque 10 noeuds encore en vie

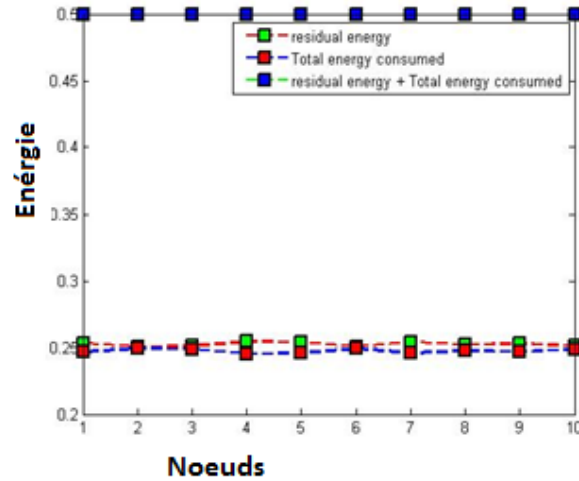


FIGURE 3.10 – Après 1230 itérations : l’énergie résiduelle et l’énergie totale consommée par chaque 10 noeuds encore vivants

Les figures 3.8, 3.9 et 3.10 montrent l’énergie totale consommée et l’énergie résiduelle pour chaque noeud encore vivant ; ici, nous voyons que presque la même valeur. Cela montre que les noeuds consomment l’énergie de manière équitable. En faite, c’est le but de notre algorithme :

- Chaque noeud envoie les données à son voisin le plus proche.
- Il envoie les données dans la même direction vers le puits (SB).
- Il n’y a pas de retour pour rien.

Ainsi, les noeuds consomment moins d’énergie et presque la même quantité, ce qui donne une longue vie et une meilleure connectivité au réseau.

3.2.4 Évaluation des performances

Les simulations ont été faites dans un environnement de programmation très populaire qui est Matlab Version 7.9.0.529 (R2009b), exécutés sur un processeur Intel Core i3-2384 à 2,3 GHz avec 4096 Mo de RAM DDR3 exécutant le système d’exploitation Ubuntu. Pour évaluer notre proposition, nous avons utilisé des métriques habituellement utilisées dans les RCSFs : nombre de capteurs actifs dans le réseau à chaque itération ; l’augmentation du nombre de capteurs actifs améliore les performances du réseau, couverture et connectivité : la couverture reflète le pourcentage de capteurs actifs dans le réseau et sa valeur indique le degré de couverture du réseau par les noeuds actifs ; la connectivité reflète la capacité des noeuds de réseau à communiquer et augmente en fonction du nombre.

3.2.5 Conclusion

Nous avons proposé et évalué une nouvelle approche simple pour établir une topologie réaliste basée sur TPG pour les réseaux de capteurs homogènes sans fil. Dans un premier temps, nous avons passé en revue les principales classes de topologie et nous avons présenté quelques paramètres universellement utilisés pour évaluer l’efficacité d’une topologie donnée. Dans le deuxième temps, nous avons présenté et modélisé notre topologie de RCSF. Premièrement, nous avons validé l’approche proposée et nous avons évalué ses performances en fonction d’un ensemble de simulations. Les résultats obtenus montrent l’efficacité de l’approche. Dans les perspectives : nous allons essayer d’appliquer cette approche pour les réseaux de capteurs hétérogènes sans fil.

3.3 Trois méthodes de routage statique multi-sauts

Dans cette section, nous avons proposé trois méthodes de routage statique multi-saut, les noeuds sont dispersés sur les sommets d'un tableau $4 * 4$, la distance entre les sommets au début est de 10 m. Puis elle prend les valeurs suivantes : 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m, 70 m, 80 m. Ces méthodes sont appelées : S-Square, S-Rhombus et S-Circle, les résultats de simulation montrent que le S-Square est meilleur que S-Rhombus et que celui-ci est meilleur que S-Circle.

3.3.1 Introduction

Dans les réseaux de capteurs sans fil, les noeuds dépensent le maximum de leur énergie dans les données de transmission, dans de nombreuses applications ces noeuds sont de petites tailles et de l'approvisionnement énergétique limitée, la recherche dans le domaine des capteurs subit aujourd'hui un changement important dans les domaines d'application (sécurité, santé, environnement, assurance alimentaire, fabrication, télécommunications, robotique). Les techniques modernes admettent de réduire la taille, le coût et la consommation d'énergie et augmenter la précision et la performance des capteurs. Beaucoup de travail a été fait pour réduire la puissance de transmission totale requise. Pour transmettre un noeud source à un noeud de destination en choisissant un système de transmission qui ne nécessite que la puissance d'émission minimale. Un ensemble de techniques est considéré comme le routage coopérative basée sur la coopération entre les noeuds voisins de la source. Dans [IHL08], [KAMZ07], et [IA07], les auteurs ont examiné divers algorithmes de routage de coopération utilisant l'avantage de diffusion sans fil et les relais. Cependant, ces systèmes ont tendance à négliger les niveaux d'énergie des noeuds du réseau dont la surutilisation conduit inévitablement à un partitionnement du réseau. Différents algorithmes ont été développés pour maximiser la durée de vie du réseau. Dans [KP03], un problème de solution globalement optimal de maximisation de la durée de vie d'un réseau a été examiné par une approche basée sur la théorie des graphes. Des études ont été faites pour augmenter la durée de vie du système, en tenant compte des noeuds restants d'énergie dans le réseau [CT04], lors du choix du chemin de transmission. Cependant, dans plusieurs littératures, minimiser la puissance de transmission et augmenter la durée de vie du réseau ont été étudiés séparément. L'organisation de cette section est la suivante : la sous-section 3.3.2 explique la topologie proposée : S-Rhombus, S-Square et S-Circle, sous-section 3.3.2 donne les résultats de simulation et la sous-section 3.3.4 est réservé à la conclusion.

3.3.2 Topologie proposée

Dans cette sous-section, nous allons traiter trois méthodes de topologie utilisées pour optimiser l'efficacité de transmission entre les noeuds et le puits, à différents routages, puis nous les comparons pour chaque noeud (le nombre des noeuds incluant le sink est $\tilde{N}_{gale} \tilde{\approx} 25$) et chaque $d_{cel} = 10$ m, 20 m, ..., 80m. Où d_{cel} est la distance entre deux têtes de cellule de tableau.

3.3.2.1 Méthode S-Rhombus

Dans la figure 3.11a ci-dessous, les noeuds de mêmes couleur forment un rhombe(ou losange), la communication entre eux suit cette forme : le noeud envoie les données à son prochain voisin dans le même rhombe et ainsi de suite pour les autres. Quand les données arrivent au dernier noeud de même rhombe, ce dernier noeud envoie les données cette fois à son voisin le plus proche dans un autre rhombe, ce mécanisme est répété jusqu'au puits qui se trouve au milieu.

TABLE 3.2 – Distance entre le capteur et son prochain voisin : méthode S-Rhombus

Numéro de capteur	Distance entre le capteur et son prochain voisin
1,2 et 3	$4.d_{cel}$
4,12,20 et 24	$1.d_{cel}$
5,7,9,11	$2.d_{cel}$
6,8,10,13,14,15,16,17,18,19,21,22 et 23	$\sqrt{2}.d_{cel}$

3.3.2.2 Méthode S-Square

Dans la figure 3.11b ci-dessous, les noeuds de mêmes couleur forment un carré, la communication entre eux suit cette forme : le noeud envoie les données à son prochain voisin dans le même carré et ainsi de suite pour les autres. Quand les données arrivent au dernier noeud de même carré, ce dernier noeud envoie à son plus proche voisin dans un autre carré, ce mécanisme est répété jusqu'à ce que le puits, situé au milieu, reçoit les données.

TABLE 3.3 – Distance entre le capteur et son prochain voisin : méthode S-Square

Numéro de capteur	Distance entre le capteur et son prochain voisin
1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13 14,15,16,17,18,19,20,21,22,23 et 24	$1.d_{cel}$

3.3.2.3 Méthode S-Circle

Dans la figure 3.11c ci-dessous, les noeuds de mêmes couleur forment un cercle ; la communication entre eux suit cette forme : le noeud envoie les données à son prochain voisin dans le même cercle et ainsi de suite pour les autres. Quand les données arrivent à la fin du cercle, le dernier noeud les envoie à son voisin le plus proche dans un autre cercle, ce mécanisme est répété jusqu'à ce que les données arrivent au puits qui est situé au milieu.

TABLE 3.4 – Distance entre le capteur et son prochain voisin : méthode S-Circle

Numéro de capteur	Distance entre le capteur et son prochain voisin
1,2 et 3	$4.d_{cel}$
4,20 et 24	$1.d_{cel}$
5,7,9,11,17,18 et 19	$2.d_{cel}$
6,8,10,16,21,22 et 23	$\sqrt{2}.d_{cel}$
12	$\sqrt{5}.d_{cel}$
13,14 et 15	$\sqrt{8}.d_{cel}$

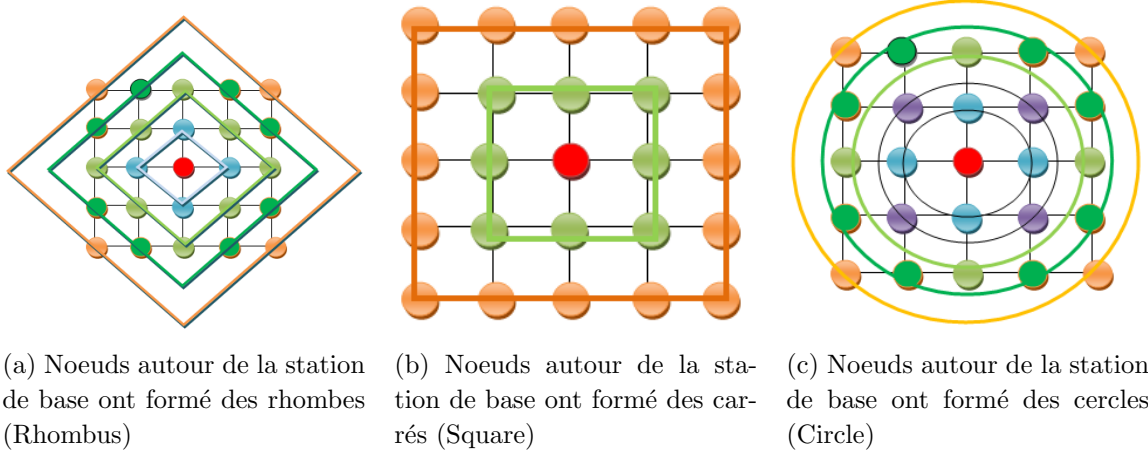


FIGURE 3.11 – Trois méthodes proposées du routage dans un RWSF (WSN)

Les noeuds capteurs de RWSF envoient leur position dans un petit message à la station de base. Dans notre travail, nous utilisons le mode d'énergie et l'analyse présentés dans [IA07] et [KP03]. Le modèle de dissipation d'énergie radioélectrique est illustré à la figure 3.12. Sur cette figure, $E_{T(x)}(k, d)$ présente l'énergie dépensée pour transmettre k bits sur une distance d , et E_{Rx} est l'énergie dépensée pour traiter un message k -bit. Le paramètre E_{elec} indique l'énergie par bit dissipée pour faire fonctionner les circuits émetteur et récepteur.

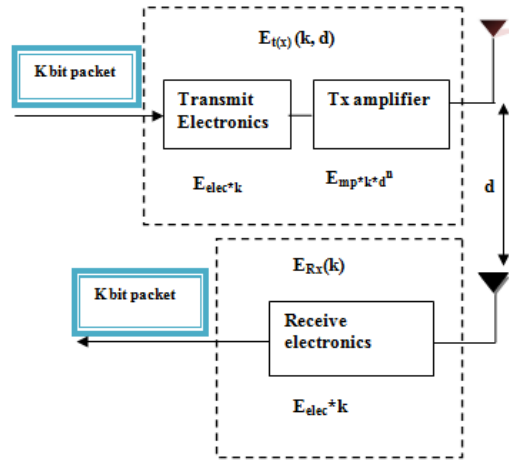


FIGURE 3.12 – Modèle de dissipation d'énergie radioélectrique [HCB02]

Ce paramètre dépend de nombreux facteurs tels que le codage numérique, la modulation, le filtrage et l'étalement du signal [KP03]. L'énergie dépensée par l'émetteur radio est donnée par l'équation 3.7 et celle dépensée par le récepteur est donnée par l'équation 3.8.

$$E_{t(x)}(k, d) = \begin{cases} k.E_{elec} + k.E_{fs}.d^2 & \text{si } d < d_0; \\ k.E_{elec} + k.E_{mp}.d^4 & \text{si } d \geq d_0. \end{cases} \quad (3.7)$$

$$E_{Rx} = k.E_{elec} \quad (3.8)$$

$$E_{agr} = k.E_{DA} \quad (3.9)$$

Où l'énergie de l'amplificateur est présentée respectivement dans un modèle d'espace libre (avec perte de puissance d^2) et dans un modèle de canal à évanouissement par trajets multiples (avec perte de puissance d^4). Ils dépendent de "d", où "d" est la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Si la distance "d" est inférieure à un seuil, alors le modèle d'espace libre est utilisé; sinon, le modèle à trajets multiples est utilisé. La valeur du seuil a été donnée par Heinzelman et al. Dans [HCB02]. Il est défini comme suit :

$$d_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{mp}}} \quad (3.10)$$

Dans cette sous-section, le capteur qui enverra ces données à la première fois prend la valeur 1, le second prend la valeur 2 et ainsi de suite jusqu'à atteindre la station de base ces chiffres sont donnés par le chemin suivi pour chaque routage statique des trois méthodes proposées : 1 est le premier noeud qui transmet ses données, le numéro 2 reçoit les données de 1 et les agrège avec ses données et les envoie aux noeuds 3, les capteurs reçoivent les données de leurs prédécesseurs et les agrègent avec leurs propres données et envoient le tout à leur successeurs ceci est répété jusqu'à la station de base. Le routage suit un formulaire comme déjà signalé. En utilisant les équations 3.7, 3.8, 3.9 et 3.10, il est possible d'ajuster pour chaque capteur (de 1 à 24) sa consommation totale d'énergie :

$$E_{total(i)}(k, d) = \begin{cases} k.(i - 1).(E_{elec} + E_{DA}) + k.i.(E_{elec} + E_{fs}.d^2) & \text{si } d < d_0; \\ k.(i - 1).(E_{elec} + E_{DA}) + k.i.(E_{elec} + E_{mp}.d^4) & \text{si } d \geq d_0. \end{cases} \quad (3.11)$$

avec :

- i est le numéro du capteur,
- d est la distance entre le capteur et son prochain voisin, nous pouvons le montrer dans les tableaux

3.2,3.3 et 3.4.

3.3.3 Résultats de la simulation

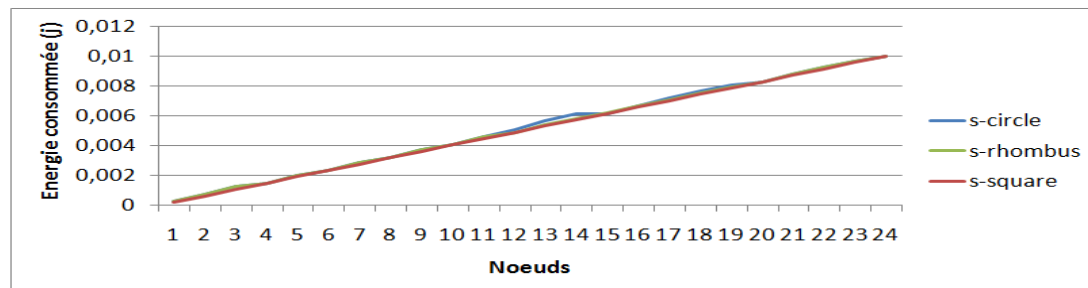
TABLE 3.5 – Caractéristiques radio utilisées dans nos simulations

Parameter	Value
E_{elec}	50 nJ/bit
E_{fs}	10 pJ/bit/m ²
E_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
E_0	0.5 J
k	4000 bits
E_{DA}	50 nJ/bit/message
d_0	88m

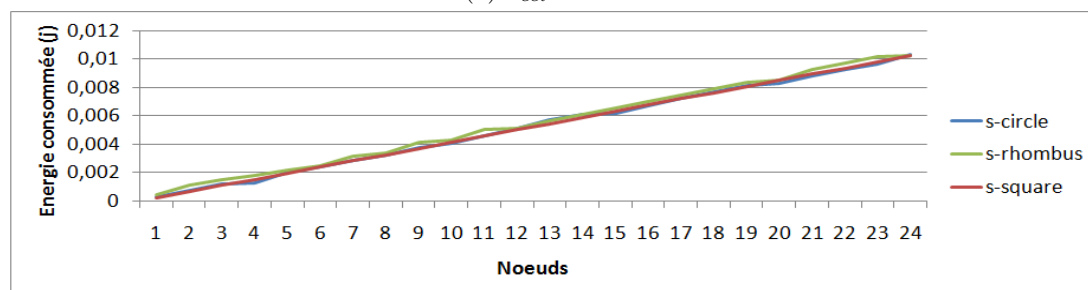
On a trié la consommation d'énergie obtenue par chaque capteur puis on trace les résultats et on obtient ces chiffres. Chaque capteur envoie des données à son voisin déjà connu selon ladite topologie, le capteur fait l'agrégation des données de son prédécesseur et envoie toutes les données à son successeur, cette procédure est répétée jusqu'à ce que les données agrégées atteignent la station de base. Toutes les simulations sont basées sur le protocole suivant. Nous considérons de nombreux réseaux de capteurs sans fil avec N = 25 noeuds dispersés sur les têtes des cellules de la table 4*4. La station de base est située au milieu. De plus, nous ignorons l'effet provoqué par la collision de signal et l'interférence dans le canal sans fil. Puisque les noeuds ont une énergie limitée, ils consomment leurs énergies au cours des simulations. Une fois qu'un noeud est à court d'énergie, il est considéré comme mort et ne peut pas transmettre ou recevoir

de données. Pour ces simulations, l'énergie diminue chaque fois qu'un noeud transmet ou reçoit des données et chaque fois qu'il effectue une agrégation de données en utilisant les paramètres radios indiqués dans le tableau 3.5.

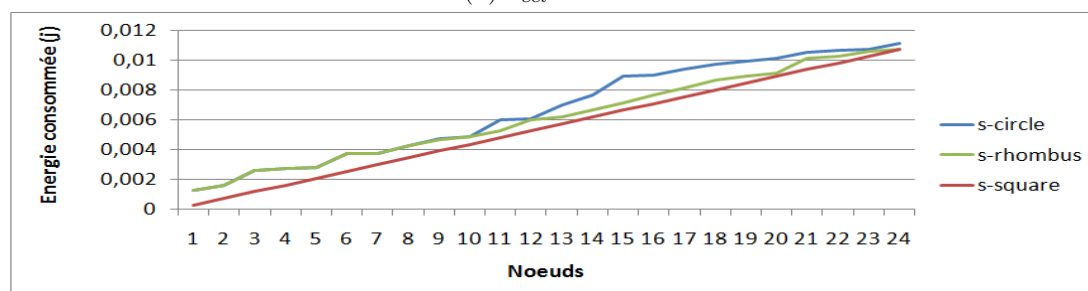
3.3.3.1 Consommation d'énergie pour chaque noeud



(a) $d_{cel} = 10$ m



(b) $d_{cel} = 20$ m



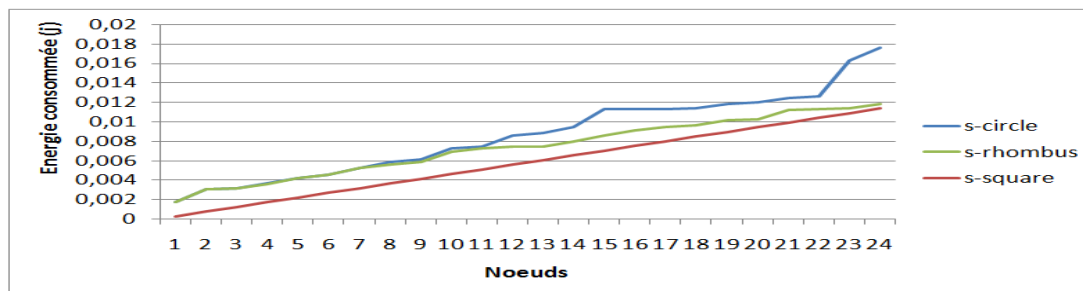
(c) $d_{cel} = 30$ m

FIGURE 3.13 – Consommation d'énergie pour chaque noeud selon d_{cel} : 10 m, 20 m et 30 m.

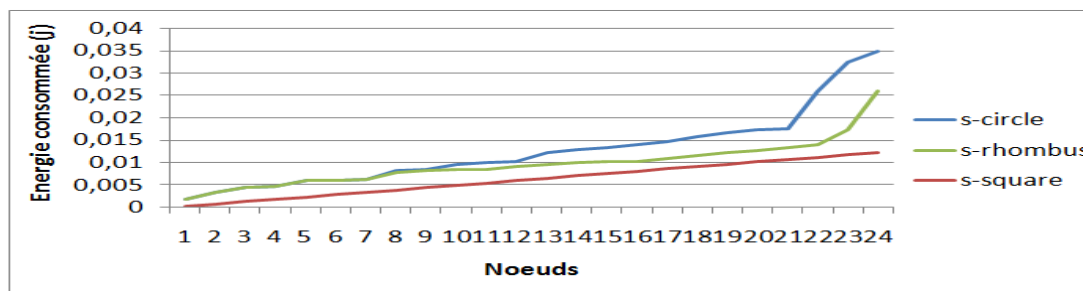
Dans cette simulation, nous avons proposé et évalué les trois types de routage appelés : S-Rhombus, S-Square, S-Circle, dans ces trois réseaux, qui sont des réseaux homogènes et multi-saut. Chaque capteur envoie à son voisin indiqué dans sa liste des voisins. Dans ce cas, la liste des voisins ne contient qu'un seul voisin. Nous supposons que les réseaux sont synchronisés et tous les capteurs ont des données pour les transmettre, notre objectif ici est de calculer la consommation d'énergie de chaque capteur, puis le calcul de la consommation d'énergie de tout le réseau. Dans la figure 3.13a les courbes sont presque les mêmes : la courbe de S-Rhombus est identique à celle de S-Circle en 17 points et est identique à celle de S-Square en quatre points et la courbe de S-Circle avec S-Square sont les mêmes en trois points, dans d'autres points, le S-Square est meilleur que S-Rhombus et celui-ci est meilleur que S-Circle.

Dans la figure 3.13b S-Square consomme plus d'un S-Circle en moyenne $3.81E-05$ et consomme moins d'un S-Rhombus en moyenne $2.6E-04$. S-Circle consomme moins d'un S-Rhombus en moyenne $3E-04$ alors S-Circle est meilleur que S-Square et celui-ci est meilleur que S-Rhombus. la courbe de S-Rhombus est identique à celle de S-Circle en :

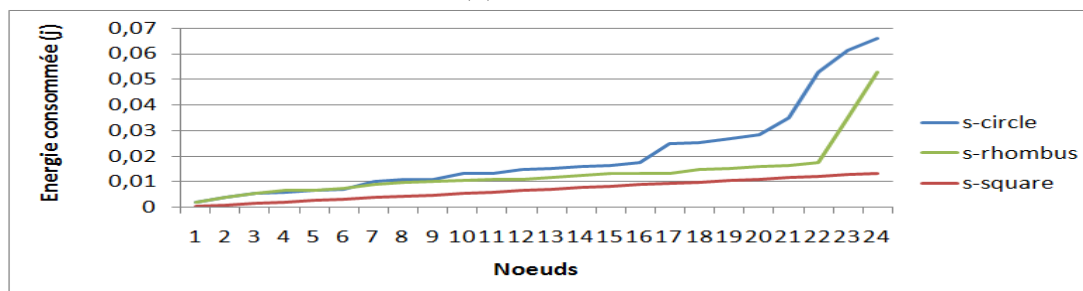
- 10 point dans la figure 3.13c



(a) $d_{cel} = 40$ m

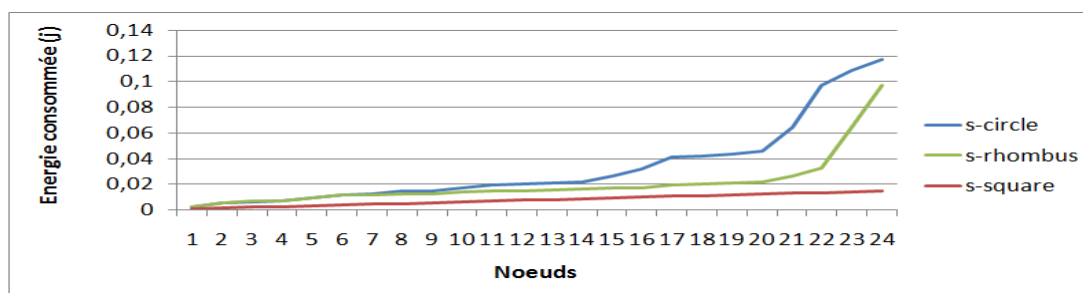


(b) $d_{cel} = 50$ m

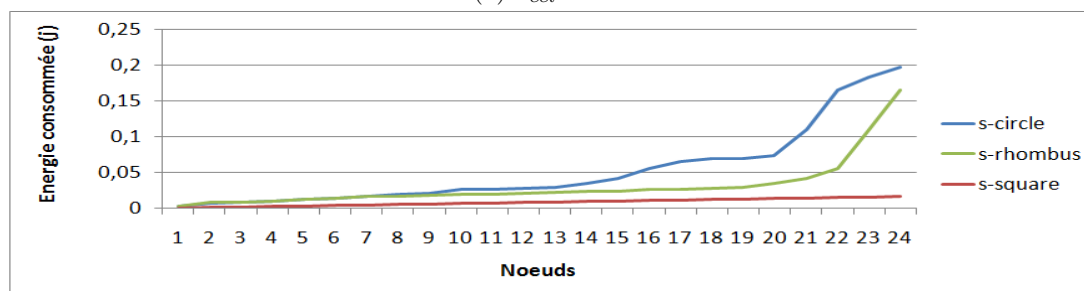


(c) $d_{cel} = 60$ m

FIGURE 3.14 – Consommation d’énergie pour chaque noeud selon d_{cel} : 40 m, 50 m et 60 m.

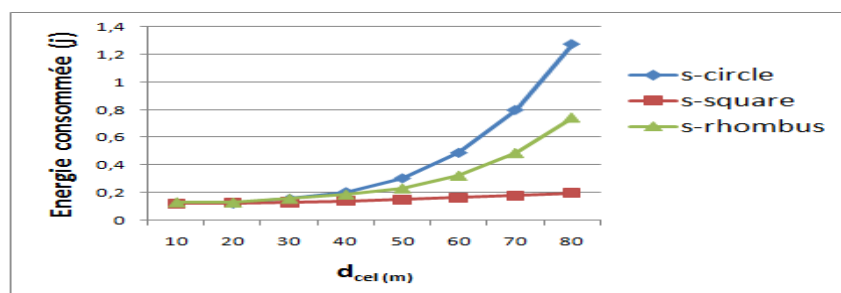


(a) $d_{cel} = 70$ m

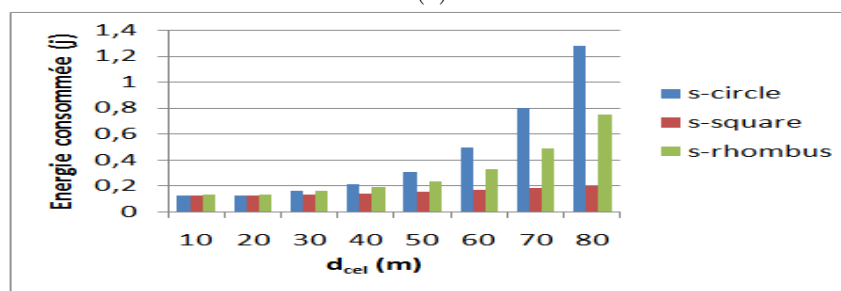


(b) $d_{cel} = 80$ m

FIGURE 3.15 – Consommation d’énergie pour chaque noeud selon d_{cel} : 70 m et 80 m.



(a)



(b)

FIGURE 3.16 – Consommation totale d'énergie selon $d_{cel} = 10$ m... 80 m pour S-Rhombus ,S-Square et S-Circle.

- 7 point dans la figure 3.14a
- 5 point dans la figure 3.14b
- 3 point dans la figure 3.14c
- 2 point dans la figure 3.15a
- 1 point dans la figure 3.15b

Sauf pour les points identiques, S-Circle consomme plus que le S-Rhombus dans toutes les figures citées, S-Square est meilleur que S-Rhombus et celui-ci est meilleur que S-Circle en consommation d'énergie.

En figures 3.16b et 3.16a S-Square surpasse S-Rhombus et celui-ci surpasse S-Circle en consommation d'énergie totale selon $d_{cel} : 10$ m ... 80 m.

Avec S-Square les capteurs consomment moins d'un S-Rhombus et moins d'un S-Circle.

3.3.3.2 Nombre de messages transmis

Dans la figure 3.17a la courbe de S-Rhombus est identique à celle de S-Circle en 17 points, dans d'autres points, le S-Square est meilleur que S-Rhombus et celui-ci est meilleur que S-Circle en sept points.

Dans la figure 3.17b le nombre de messages envoyés par un noeud qui consomme moins d'énergie dans : S-Square est 2314, S-Circle est 1893 et pour S-Rhombus est 1096

. La courbe de S-Rhombus est identique à celle de S-Circle en :

- 13 points dans la figure 3.17c
- 7 points dans la figure 3.18a
- 6 points dans la figure 3.18b
- 5 points dans la figure 3.18c

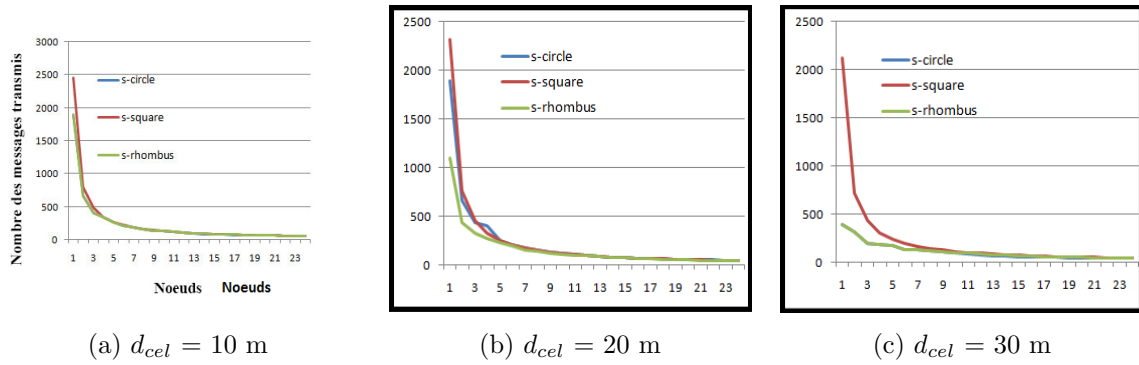


FIGURE 3.17 – Nombre de messages transmis pour chaque noeud selon d_{cel} : 10 m, 20 m et 30 m.

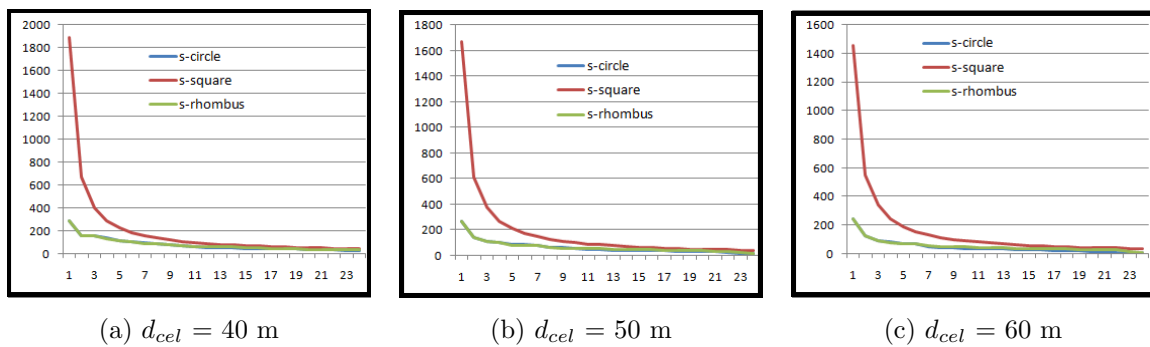


FIGURE 3.18 – Nombre de messages transmis pour chaque noeud selon d_{cel} : 40 m, 50 m et 60 m.

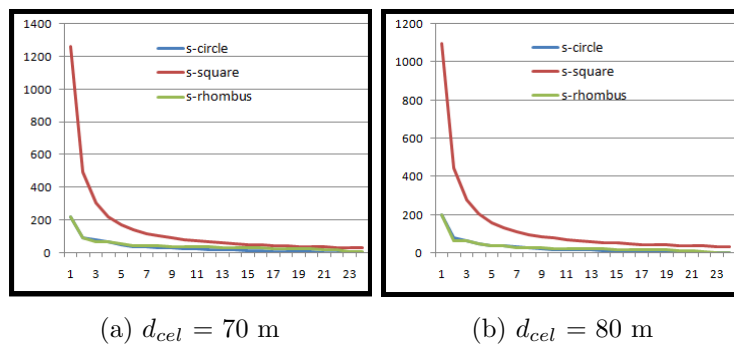


FIGURE 3.19 – Nombre de messages transmis pour chaque noeud selon d_{cel} : 70 m et 80 m.

TABLE 3.6 – Nombre de messages transmis jusqu'à ce que le premier noeud soit mort pour chaque d_{cel} dans : S-Circle, S-Square et S-Rhombus.

d_{cel}	S-Circle	S-Square	S-Rhombus
10	50	50	50
20	48	48	48
30	45	46	45
40	28	43	40
50	14	40	19
60	7	37	9
70	4	34	5
80	2	31	3

- 4 points dans la figure 3.19a
- 5 points dans la figure 3.19b

Sauf pour les points qui sont identiques, la différence entre eux est très faible. Nous pouvons voir que S-Square est meilleur que S-Rhombus et que celui-ci est meilleur que S-Circle en nombre de messages envoyés par chaque noeud.

3.3.4 Conclusion

Dans cette section, nous avons proposé et évalué trois méthodes de transmission appelées : S-Rhombus, S-Square, S-Circle pour établir un routage réaliste basé sur une topologie spécifique de réseaux de capteurs sans fil homogènes. D'abord, nous avons passé en revue les principales classes de topologies et nous avons présenté certains paramètres universellement utilisés pour évaluer l'efficacité d'une topologie donnée. Nous avons aussi distribué des capteurs sur les têtes de chaque cellule de table quatre * quatre et le puits (SB) au milieu. Nous avons observé que la distribution des capteurs autour du puits (SB) peut prendre la forme d'un carré, d'un rhombe ou d'un cercle, c'est pourquoi nous avons choisi de faire des routes statiques à mesure que ces formes sont obtenues. Nous avons, ensuite, validé l'approche proposée et nous avons évalué ses performances en fonction d'un ensemble de simulations. Les résultats de simulations, basés sur la consommation d'énergie de la première itération et le nombre de messages transmis, montrent que la méthode S-Square est la meilleure suivie de la méthode S-Rhombus au deuxième rang tandis que la méthode S-Circle est classée troisième. Donc, avec la méthode S-Square les RCSFs auront une longue durée de vie qu'avec les deux autres méthodes.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé et évalué une nouvelle approche simple pour établir une topologie réaliste basée sur TPG pour les réseaux de capteurs homogènes sans fil. Nous avons validé l'approche proposée et nous avons évalué ses performances en fonction d'un ensemble de simulations. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de l'approche. De même pour la deuxième section où nous avons proposé trois méthodes de routages. Les résultats de simulations, basés sur la consommation d'énergie de la première itération et le nombre de messages transmis, montrent que la méthode S-Square est la meilleure suivie de la méthode S-Rhombus au deuxième rang tandis que la méthode S-Circle est classée troisième. Donc les RCSFs avec la méthode S-Square auront une longue durée de vie qu'avec les deux autres méthodes.

**PROPOSITION D'UN ALGORITHME DE ROUTAGE INTELLIGENT POUR
LES RCSFs**

4.1	Introduction	56
4.2	Algorithmes de problème du voyageur de commerce (Colonies de Fourmis) . .	57
4.2.1	Algorithmes de colonies de fourmis	57
4.2.2	Fonctionnement de l'algorithme	57
4.2.3	Résultats	58
4.3	Inspiré de Colonie de fourmis : Algorithme de routage intelligent du réseau de capteurs sans fil	60
4.3.1	Algorithme d'optimisation des colonies de fourmis	61
4.3.2	Algorithme proposé	61
4.3.3	Résultats de la simulation	64
4.4	Conclusions	69

4.1 Introduction

Ces dernières années, de plus petits appareils électroniques sont apparus, si bien que différents réseaux sans fil ont vu le jour. L'amélioration des débits de données et la réduction de la consommation d'énergie sont des défis pour améliorer ces réseaux. Des débits de données plus élevés sont requis à mesure que l'accès à Internet devient plus populaire. C'est pourquoi, l'allocation de plus de la bande passante, ou le traitement de signaux avancés avec une efficacité spectrale sont nécessaires. En fait, le problème majeur dans les réseaux sans fil était toujours la consommation d'énergie [BSA16]. Certaines applications de réseaux sans fil émergentes sont conçues pour exiger des débits de données faibles. Par conséquent, la préoccupation de consommation d'énergie est plus grande que celle des taux de données élevés. Le réseau de capteurs sans fil est un autre type de réseau sans fil émergent où une faible consommation d'énergie est plus critique que les débits de données élevés. En fait, les réseaux de capteurs sans fil sont devenus un domaine de recherche et d'application grandissant, avec l'avancement des technologies de l'information [DWM09, SD02, BTN10, TdF96, SCB02, BSRA17]. Les RCSFs ont été appliqués dans de nombreuses applications différentes telles que le suivi des véhicules système, surveillance du trafic, applications médicales, etc. Avec des parties de détection intégrées dans les noeuds, un RCSF peut surveiller et collecter des informations ou des données dans la zone déployée. Les paquets de données collectées délivrent des noeuds sources au seul noeud récepteur, ce qui coûte de l'énergie. Les RCSFs mettent l'accent sur un déploiement plus simple et une bonne flexibilité des périphériques. Avec le développement technologique rapide des capteurs, ce qui améliorera grandement l'efficacité et la fiabilité des systèmes d'infrastructure, les réseaux de technologie de l'information évolueront vers la technologie clé pour l'Internet des objets (IoT). Parmi les principales préoccupations liées aux applications de l'IoT, il y a l'extension de la durée de vie de la batterie des appareils mobiles Machine To Machine (M2M) pour faire fonctionner le système IoT pendant une période plus longue. En conséquence, dans la vaste masse des applications de l'internet des objets, la communication économe en énergie et l'approvisionnement énergétique stable sont devenus les objectifs prioritaires dans l'allocation des ressources [TMP18]. Plusieurs protocoles ont été implémentés par exemple, la LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) basée sur les grappes ("clusters") [SSS10], qui est basée sur cluster et Directed Diffusion (DD). ACO (Ant Colony Optimization) est une approche méta-heuristique répandue pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire tels que le problème du vendeur de transport asymétrique, le routage du véhicule, le routage dans les RCSFs (WSNs), etc. Cet algorithme est inspiré du comportement des colonies de fourmis. En raison de l'alimentation électrique limitée, la maximisation de la durée de vie d'un réseau RCSF (WSN) est cruciale pour la performance du protocole de routage. Dans ce chapitre, ACO est adopté et amélioré pour concevoir un algorithme de routage intelligent afin de maximiser la durée de vie d'un RCSF. Nous allons présenter notre contribution inspirée de colonies de fourmis, nous passons tout d'abord par l'utilisation du l'algorithme de colonie de fourmis pour trouver de solution optimale de certains problèmes, nous focalisons dans notre cas, sur l'un de ces problèmes pour voir en clair l'apport de l'algorithme de colonies de fourmis, qui nous a poussé, par la suite, à l'utiliser, pour équilibrer la consommation d'énergie, dans les réseaux de capteurs sans fil, entre tous les noeuds, afin de les garder longtemps en vie. Ce qui augmente automatiquement la connectivité et longévité du réseau. Notre cas concerne la résolution du Problème du Voyageur de Commerce à l'aide d'algorithmes de Colonies de Fourmis. Il s'agit, de trouver une solution optimale au problème du voyageur de commerce adaptée aux réseaux de capteurs sans fil et par la suite minimiser leurs consommations d'énergie, car il y a une relation entre cette dernière (l'énergie) et la distance entre les capteurs qui se communiquent.

4.2 Algorithmes de problème du voyageur de commerce (Colonies de Fourmis)

- Énoncé :

L'énoncé du problème du voyageur de commerce : étant donné n villes et les distances séparant entre les villes, il faut trouver un chemin de longueur totale minimale qui passe exactement une fois par chaque ville et revient au point de départ. Il n'existe pas de méthode de résolution exacte en temps raisonnable pour un nombre important de villes. On devra alors se contenter de solutions approchées.

- Énoncé formelle :

Il existe une énoncé formelle du problème du voyageur de commerce sous forme de problème d'optimisation combinatoire. Soit un graphe complet $G = (V, A, \omega)$ avec V : un ensemble de sommets, A : un ensemble d'arrêtes et ω : une fonction de coût sur les arcs. Le problème est de trouver le plus court cycle hamiltonien dans un graphe.

4.2.1 Algorithmes de colonies de fourmis

Les algorithmes de colonies de fourmis sont des algorithmes qui s'inspirent du comportement des fourmis. Il s'agit d'une classe de méta-heuristiques d'optimisation.

- Les fourmis :

Il est intéressant d'observer le comportement des fourmis dans la nature : chaque fourmi est une entité indépendante, sans hiérarchie. Mais, quelle que soit la situation dans laquelle elles se trouvent, c'est le bien-être de la communauté qui prime. Il y a une sorte d'"intelligence collective".

- Fonctionnement :

Rapportés à notre problème, nous pouvons observer dans la nature qu'elles choisissent toujours le chemin le plus court pour aller de leur nid à une source de nourriture. C'est, cette manière de procéder que nous allons modéliser dans ce travail au cours de leur parcours dans leur recherche de nourriture les fourmis déposent des phéromones sur le chemin qu'elles empruntent. Les autres fourmis sont capables de détecter ces phéromones grâce à leurs antennes. Elles vont avoir tendance à choisir les pistes contenant le plus de phéromones et les plus courtes permettant d'accéder à leur nourriture (elles "sentent" la nourriture). Amenées à une colonie entière, les fourmis sont capables de déterminer le chemin le plus court entre leur nid et la source de nourriture.

- Intérêt :

Les fourmis arrivent à résoudre un problème complexe à l'aide de moyens que nous pouvons simuler avec un algorithme. C'est pourquoi cette classe d'algorithmes est intéressante.

- Objectifs :

L'objectif sera bien évidemment de résoudre le problème du voyageur de commerce en utilisant un algorithme de colonies de fourmis. Dans le cadre de ce travail, toutes les villes sont reliées entre elles pour simplifier l'algorithme que nous aurons à écrire. Nous aurons également à définir les différentes constantes à utiliser de manière à optimiser le fonctionnement de notre programme : choix stochastique de la ville suivante vers laquelle va se diriger la fourmi à un instant t ...

4.2.2 Fonctionnement de l'algorithme

1. Initialisation : on choisit m fourmis à répartir aléatoirement dans les n villes ($m > n$).

2. Pour chaque fourmi, la liste qui modélise sa mémoire contient sa ville de départ.
3. Les pistes de phéromones sont initialisées comme suit : $t_{ij}(0) = c$ où c est une petite constante positive.

Fin d'un cycle.

Après n itérations, nous sommes à l'instant t , toutes les fourmis ont terminé leur tour, chacune a une liste "mémoire" pleine et est revenue à sa propre ville de départ. à ce moment :

1. Chaque fourmi calcule la longueur du circuit hamiltonien parcouru.
2. Les quantités de phéromones sont mises à jour. En d'autres termes, la fourmi refait son tour en sens inverse tout en déposant des phéromones le long de chaque arc traversé.
3. On observe quelle fourmi a trouvé le circuit hamiltonien de longueur minimale. Si ce tour est meilleur que le circuit de l'itération précédente, on le mémorise.
4. Les mémoires des fourmis (liste des villes visitées) sont effacées.
5. Les fourmis recommencent un nouveau tour, toujours au départ de la ville sur laquelle elles avaient été placées au début de l'algorithme.

Fin de l'algorithme. On arrête l'algorithme après un nombre de cycles égal à une constante NC_{max} .

4.2.3 Résultats

Nous avons obtenu ces résultats avec 70 noeuds(villes),

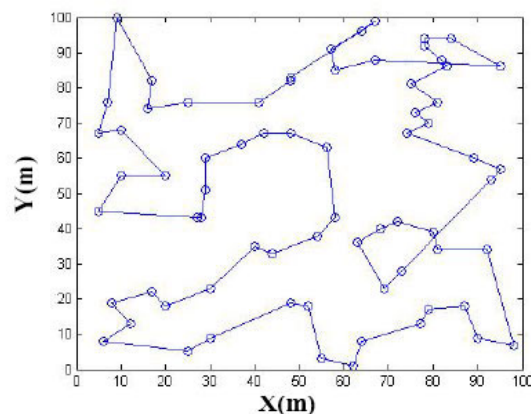


FIGURE 4.1 – itime=90

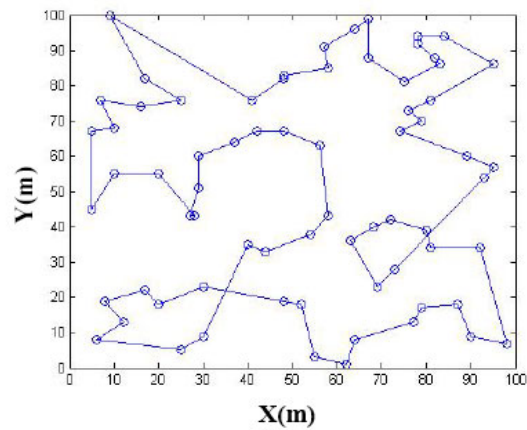


FIGURE 4.2 – itime=120

Les figures 4.1, 4.2 et 4.3 montrent une comparaison de l'évolution de la longueur du meilleur tour, au cours du temps l'algorithme de colonie de fourmis converge plus vite vers une solution qui est plus proche de l'optimal.

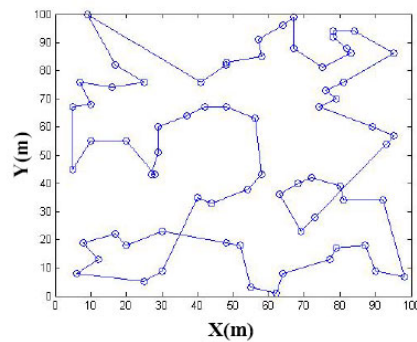


FIGURE 4.3 – itime=160

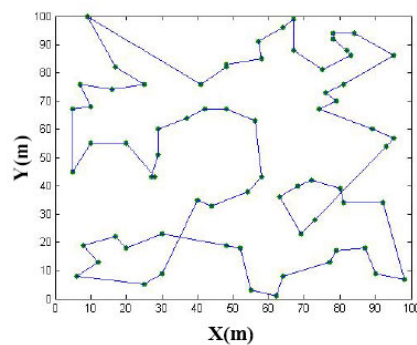


FIGURE 4.4 – Résultat final : le meilleur chemin

La figure 4.4 présente cette meilleure solution. Il faut remarquer que les circuits hamiltoniens pour cet ensemble de noeuds (la figure 4.4), ce qui indique donc un meilleur fonctionnement.

Le graphe montrant le meilleur chemin est quant à lui identique à celui de la figure 4.4. Nous avons appliqué l'algorithme avec un problème de petite taille c'est-à-dire 70 noeuds (figure 4.1,

4.2 et 4.3). Durant nos essais, l'algorithme a toujours découvert le tour optimal en environ mille cycles. Le temps d'exécution total est de huit minutes et 36 secondes sur un core i3, 2.3Ghz (ce test comprend les tests de stagnation, affichage des statistiques et l'exportation des résultats.). La figure 4.5 en haut montre la comparaison de la longueur moyenne des tours avec la longueur du meilleur tour, celle en bas indique le nombre moyen de branchements possibles.

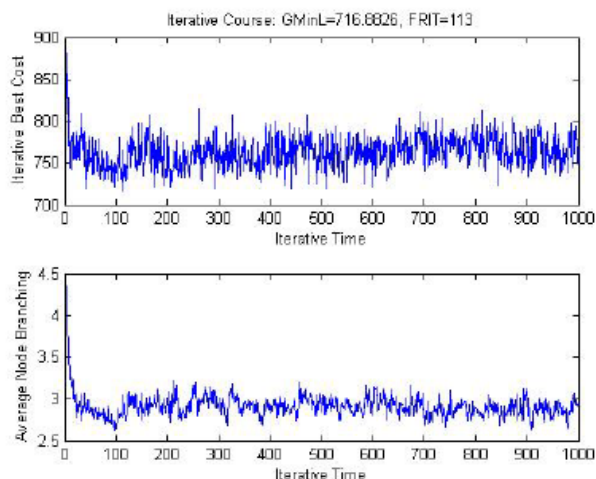


FIGURE 4.5 – Meilleur coût itératif et noeud de branchement moyen par temps itératif

Après avoir vu l'apport de l'algorithme de colonies de fourmis pour résoudre le problème des voyageurs commerciaux, nous allons nous en inspirer et développer un algorithme de routage intelligent pour les réseaux de capteurs sans fil dans la section suivante.

4.3 Inspiré de Colonie de fourmis : Algorithme de routage intelligent du réseau de capteurs sans fil

En bref, les réseaux de capteurs sans fil (WSN) sont un ensemble de noeuds d'alimentations limitées, utilisés pour collecter les données déterminées d'une zone. Augmenter la durée de vie est le principal défi pour optimiser les protocoles de routage de RCSF(WSN), car l'énergie de capteurs est limitée dans la plupart des cas. à cet égard, cette section présente un nouvel algorithme de routage intelligent de réseaux de capteurs sans fil, constitué de noeuds stables dispersés de façon aléatoire et cette approche est inspirée des colonies de fourmis. L'algorithme proposé prend en compte la distance entre deux noeuds, la longueur de chemin choisie et l'énergie résiduelle des noeuds de façon à mettre à jour la probabilité de choix du noeud suivant parmi les noeuds voisins, contrairement à plusieurs algorithmes de routage ; d'une part, les noeuds regroupent les données de leurs prédécesseurs et les envoient à tous à leurs successeurs ; d'autre part, la source est presque toujours changée à chaque itération. Par conséquent, la consommation d'énergie est équilibrée entre les noeuds. Par conséquent, la durée de vie du réseau sera augmentée. Des descriptions détaillées et un ensemble de simulation utilisant Matlab sont fournis pour mesurer la durée de vie du réseau et l'énergie consommée par les noeuds de l'approche proposée est présentée. Les conséquences des simulations sur les répliques prouvent le succès de notre futur algorithme de routage (SRA).

4.3.1 Algorithme d'optimisation des colonies de fourmis

L'optimisation de la colonie de fourmis [YGY11] fonctionne de manière itérative. Un certain nombre de fourmis sont utilisées à chaque itération. AS ou ant système est le premier algorithme

dans la catégorie des algorithmes ACO. Au cours des dernières décennies, il y a eu beaucoup de recherches qui utilisent la colonie de fourmis telles que : la stratégie élitiste pour le système de fourmi (EAS), AS_rank, Max-Min AS ou le système de colonies de fourmis (ACS) [DB11]. Dans l'AS, après que les fourmis ont fait leurs visites, en train de chercher de la nourriture, chaque fourmi met des phéromones pour former des traces de phéromones. Après que les fourmis déposent les phéromones, les parties de phéromones s'évaporent avec le temps. Par conséquent, la route la plus courte croisée par une fourmi, aura plus de quantité de phéromone déposée. Généralement, chaque fourmi choisit avec plus de probabilité la route avec plus de phéromone. Ainsi, les longs chemins reçoivent moins de phéromones que le court chemin. L'ACS améliore AS en faisant l'introduction d'une mise à jour locale des phéromones dans le processus de construction de la tournée. Toutes les fourmis effectuent la mise à jour de la phéromone locale après chaque étape de construction. à la fin de chaque itération, une seule fourmi applique la mise à jour de la phéromone hors ligne, qui peut être soit la meilleure itération, soit la meilleure à ce jour. Le règlement de résolution utilisé par les fourmis tout au long de la procédure de création est une divergence essentielle ajoutée entre ACS et AS. En fait, ACS utilise la règle du pseudo-aléatoire proportionnel. Dans notre travail, nous allons ajouter le paramètre d'énergie résiduelle. Ainsi, un arc appartenant à un chemin court et ayant plus d'énergie résiduelle pour ces deux bords sera plus susceptible d'être choisi que les autres bords même s'ils sont trop courts car ils ont moins d'énergie résiduelle.

4.3.2 Algorithme proposé

Cette partie décrit notre algorithme de routage intelligent (SRA, Smart Routing Algorithm) : que tous les noeuds communiquent entre eux, si le premier noeud détecte un événement, il cherchera son successeur, il diffuse le message de requête. Si un noeud voisin reçoit ce message de requête, il stockera d'abord l'ID de l'expéditeur dans sa liste-voisine, puis diffusera sa propre puissance et son identifiant de récepteur et son positionnement (x, y) en guise de réponse, puis attendra un accusé de réception, si l'accusé de réception est reçu. Par conséquent, ces noeuds, émetteur et récepteur, sont connectés et peuvent communiquer entre eux. Lorsque tous les destinataires finissent de faire la même chose, le noeud , qui enverra les données, possède d'abord la liste de ses voisins, ensuite il effectue le calcul de la probabilité, $p_{i,j}$, pour chaque candidat "j" appartenant à cette liste, puis exécute la ligne 7 à la ligne 14 de l'algorithme 2 pour choisir son prochain meilleur noeud voisin qui recevra les données et en les envoie. Après cela, le noeud suivant reçoit des données, les agrège avec les siennes et envoie toutes les données, en utilisant le SRA (Smart Routing Algorithm), à son successeur et ce processus est répété jusqu'à ce que les données arrive à la station de base. La première itération est comptée lorsque les données arrivent à la station de base. Ce mécanisme est répété jusqu'à un certain nombre d'itérations ; dans notre cas, on s'arrête à 50 itérations (les noeuds sont tous vivants). La probabilité que le noeud i envoie au noeud j est donnée par l'équation (4.1) :

$$p_{i,j} = \frac{(\tau_{i,j})^\alpha \cdot (\eta_{i,j})^\beta \cdot (E_{res}(i))^\gamma \cdot (E_{res}(j))^\delta}{\sum (\tau_{i,j})^\alpha \cdot (\eta_{i,j})^\beta \cdot (E_{res}(i))^\gamma \cdot (E_{res}(j))^\delta}, \quad (4.1)$$

où :

- $\tau_{i,j}$ est la quantité de phéromone sur le bord (i, j) ,
- $\eta_{i,j}$ est l'opportunité du bord (i, j) ,
- α est une variable pour ajuster l'effet de $\tau_{i,j}$,
- β est une variable pour ajuster l'effet de $\eta_{i,j}$,

- $E_{res}(i)$ est l'énergie résiduelle du noeud i ,
- $E_{res}(j)$ est l'énergie résiduelle du noeud j ,
- γ est une variable pour ajuster l'effet de $E_{res}(i)$,
- δ est une variable pour ajuster l'effet de $E_{res}(j)$.

La quantité de phéromones est renouvelée et appliquée aux arcs retracés (backtracking) tel qu'elle est indiquée dans l'équation (4.2) :

$$\tau_{i,j} = (1 - \rho)\tau_{i,j} + \Delta\tau_{i,j}, \quad (4.2)$$

où :

- ρ est le taux d'évaporation des phéromones,
- $\Delta\tau_{(i,j)}$ est la quantité de phéromone mise, généralement offerte par :

$$\Delta\tau_{(i,j)} = \begin{cases} \frac{1}{L}, & \text{si le noeud } i \text{ envoie les données au noeud } j, \\ 0, & \text{sinon,} \end{cases} \quad (4.3)$$

où :

- L est la longueur du chemin,

L'opportunité du bord (i, j) est donnée par cette équation

$$\eta_{(i,j)} = \frac{1}{\delta_{(i,j)}}. \quad (4.4)$$

Dans ce travail, les noeuds de RCSF envoient en collaboration leurs données capturées au récepteur. Nous utilisons le modèle d'énergie de dissipation [IA07, CT04] comme le montre la figure 4.6. Dans cette figure, $E_{T(x)}(k, \delta)$ est l'énergie dépensée pour la transmission de k bits le long d'une distance δ , et E_{Rx} est l'énergie dépensée pour recevoir un k -bit de données. L'élément E_{elec} dépend de la modulation, du filtrage, du codage numérique et de l'étalement du signal [CT04]. Cet élément est l'énergie dissipée par bit pour travailler les circuits du récepteur et de l'émetteur.

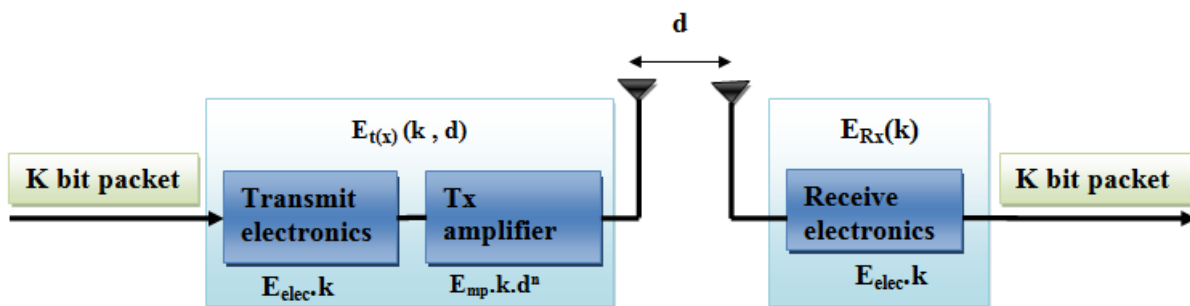


FIGURE 4.6 – Radio energy dissipation model, adopted from [HCB02].

Algorithme 2 : Algorithme de routage intelligent (Smart Routing Algorithm) SRA

```

1 initialisation : initialiser  $\tau_{i,j}$  et  $\eta_{i,j}$ ;
2  $n$  = nombre de noeuds,  $m$  = nombre d'itérations;  $ls$  : liste de tous les noeuds;
3  $i=1$ ;  $t=1$ ;
4 while  $t \leq m$  do
5     calculer  $p_{i,j}$  pour chaque candidat des noeuds voisins, appartient à  $ls$  ;
6     while  $i \leq n$  do
7         pour chaque candidat : créer un vecteur contenant  $p$  fois le candidat;
8         créer un vecteur contient tous ces vecteurs;
9         mélanger les éléments de ce vecteur;
10        choisir arbitrairement un élément de ce vecteur;
11        le noeud suivant est celui sélectionné à partir de ce vecteur;
12        supprimer  $i$  dans la liste  $ls$  ( $ls = ls - i$ );
13        envoie les données et la nouvelle liste  $ls$  au noeud suivant;
14         $i \leftarrow i + 1$ ;
15    end
16    le noeud envoie au puits;
17    mettre à jour  $\tau_{i,j}$  and  $p_{i,j}$ ;
18     $t \leftarrow t + 1$ .
19 end

```

L'énergie dépensée par l'expéditeur radio est proposée dans l'équation (4.5) et par le récepteur dans l'équation (4.6). L'équation (4.7) est la puissance nécessaire pour agréger les données :

$$E_{t(x)}(k, \delta) = \begin{cases} k.E_{elec} + k.E_{fs}.\delta^2 & \text{si } \delta < \delta_0, \\ k.E_{elec} + k.E_{mp}.\delta^4 & \text{si } \delta \geq \delta_0, \end{cases} \quad (4.5)$$

$$E_{Rx} = k.E_{elec}, \quad (4.6)$$

$$E_{agr} = k.E_{DA}, \quad (4.7)$$

où :

- δ est la distance entre l'expéditeur et le destinataire,
- E_{fs} et E_{mp} sont l'énergie de l'amplificateur, pour le premier, dans le modèle d'espace libre, et, pour le second, dans le modèle de trajets multiples.

Si δ est inférieur à un seuil δ_0 , alors les paramètres δ^2 et E_{fs} sont utilisés ; sinon, les éléments δ^4 et E_{mp} sont utilisés. La valeur du seuil δ_0 est montrée dans [HCB02], et présentée dans l'équation (4.8) :

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{mp}}}. \quad (4.8)$$

Dans ce travail, le premier capteur qui enverra ses données prend la valeur 1, le second prend la valeur 2, et ainsi de suite jusqu'à atteindre la station de base. Ces chiffres sont donnés par le chemin qui sera suivi pendant chaque itération, en utilisant SRA : 1 est le premier noeud qui va transmettre ses données, le numéro 2 recevra les données de 1, il les agrégera avec ses propres données et les enverra toutes au noeud 3. Donc les capteurs recevront les données de leurs prédécesseurs, les agrégeront avec leurs propres données, puis les enverront toutes à leurs successeurs. Ceci est répété jusqu'à la station de base.

Le routage suit un chemin qui sera choisi dynamiquement en utilisant SRA. En utilisant les équations (4.5)–(4.8), il est possible d'ajuster pour chaque capteur, de 1 à 25, son énergie consommée pendant les itérations de l'équation (4.9).

$$E_{iter}(i) = \begin{cases} k \cdot (i - 1) \cdot (E_{elec} + E_{DA}) + k \cdot i \cdot (E_{elec} + E_{fs} \cdot \delta^2) & \text{si } \delta < \delta_0, \\ k \cdot (i - 1) \cdot (E_{elec} + E_{DA}) + k \cdot i \cdot (E_{elec} + E_{mp} \cdot \delta^4) & \text{si } \delta \geq \delta_0, \end{cases} \quad (4.9)$$

où :

- i est le numéro du capteur.

L'énergie moyenne consommée dans un réseau à chaque itération, l'équation (4.10), est la somme de l'énergie consommée par chaque capteur jusqu'à cette itération divisée par le nombre de capteurs participant à ce réseau :

$$E_{avg_{iter}} = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n E_{iter}(i), \quad (4.10)$$

où :

- n est le nombre de capteurs participant à ce réseau.

L'énergie totale consommée par un capteur, l'équation (4.11), est l'énergie consommée jusqu'à la dernière itération :

$$E_{total_{iter}}(i) = \sum_{iter=1}^{it} E_{iter}(i). \quad (4.11)$$

L'énergie consommée moyenne du réseau, l'équation (4.12), est l'énergie totale consommée par tous les capteurs divisée par le nombre de capteurs :

$$E_{avg} = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n E_{total_{iter}}(i). \quad (4.12)$$

4.3.3 Résultats de la simulation

La consommation d'énergie obtenue par chaque capteur est calculée puis les résultats sont tracés. Ces chiffres sont obtenus, chaque capteur envoie des données à son voisin choisi en utilisant l'algorithme SRA, le capteur agrège les données de son prédécesseur et envoie toutes les données à son successeur. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que les données agrégées atteignent la station de base. Les simulations entières dépendent de ce protocole à venir : nous considérons 25 noeuds de réseaux de capteurs sans fil dispersés arbitrairement sur une surface de 25 m × 25 m. La station de base est au milieu. De plus, nous négligeons l'effet causé par la collision de signaux et les interférences dans le canal sans fil. En raison de l'énergie limitée des noeuds, lors des simulations, l'énergie diminue lorsqu'un noeud envoie ou reçoit des données et chaque fois qu'il regroupe des données. Dans le cas où un noeud manque d'énergie, il ne peut ni envoyer ni recevoir de données. Par conséquent, il sera ignoré dans le réseau lors des prochaines itérations. Les paramètres présentés dans le tableau 4.1 sont utilisés dans nos simulations. Comme on le voit sur la figure 4.7, nous distribuons les capteurs de manière aléatoire et nous positionnons la station de base au milieu de la surface. On peut voir sur les figures 4.8 - 4.11 qu'à chaque itération un noeud qui va commencer la transmission n'est pas nécessairement le même ; ça change d'une itération à l'autre. Si un noeud veut transmettre les données, il cherche son successeur en fonction de sa probabilité, ce que nous avons vu dans l'équation (4.1) ; de même, les autres noeuds font la même chose jusqu'à ce que les données arrivent à la station de base.

TABLE 4.1 – Caractéristiques radio utilisées dans nos simulations.

Paramètre	Valeur
E_{elec}	50 nJ/bit
E_{fs}	10 pJ/bit/m ²
E_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
E_0	0.5 J
k	4000 bits
E_{DA}	50 nJ/bit/message
d_0	88 m
α	4
β	2
γ	2
δ	4
ρ	0.02
valeur initiale de $\tau_{i,j}$	0.0001
valeur initiale de $\eta_{i,j}$	0.0001

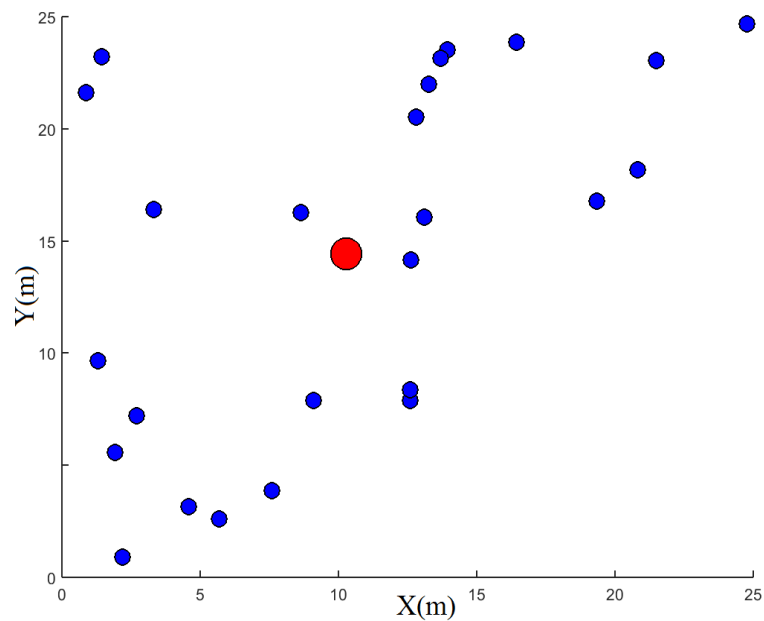


FIGURE 4.7 – Station de base au milieu et les noeuds sont dispersés arbitrairement.

Des itérations 1 à 15, figure 4.8, on voit que le chemin minimum est de 253.2010 m et le chemin maximum est de 369.8450 m.

à partir des itérations 16 à 20, figure 4.9, on voit que le chemin minimum est de 290.5974 m et le chemin maximum est de 349.5204 m.

à partir des itérations 21 à 35, figure 4.10, on voit que le chemin minimum est de 262,4805 m et le chemin maximum est de 370,5428 m.

à partir des itérations 31 à 45, figure 4.11, on voit que le chemin minimum est de 272,8723 m et le chemin maximum est de 346,5317 m. On voit dans les figures 4.8–4.11 que le chemin choisi lors de ces itérations n'est pas toujours le plus court chemin même si le réseau connaît le plus petit(court) chemin, car l'énergie résiduelle des noeuds était prise en compte. La source n'est pas toujours la même car le but de notre papier est d'équilibrer la consommation d'énergie dans tous les noeuds.

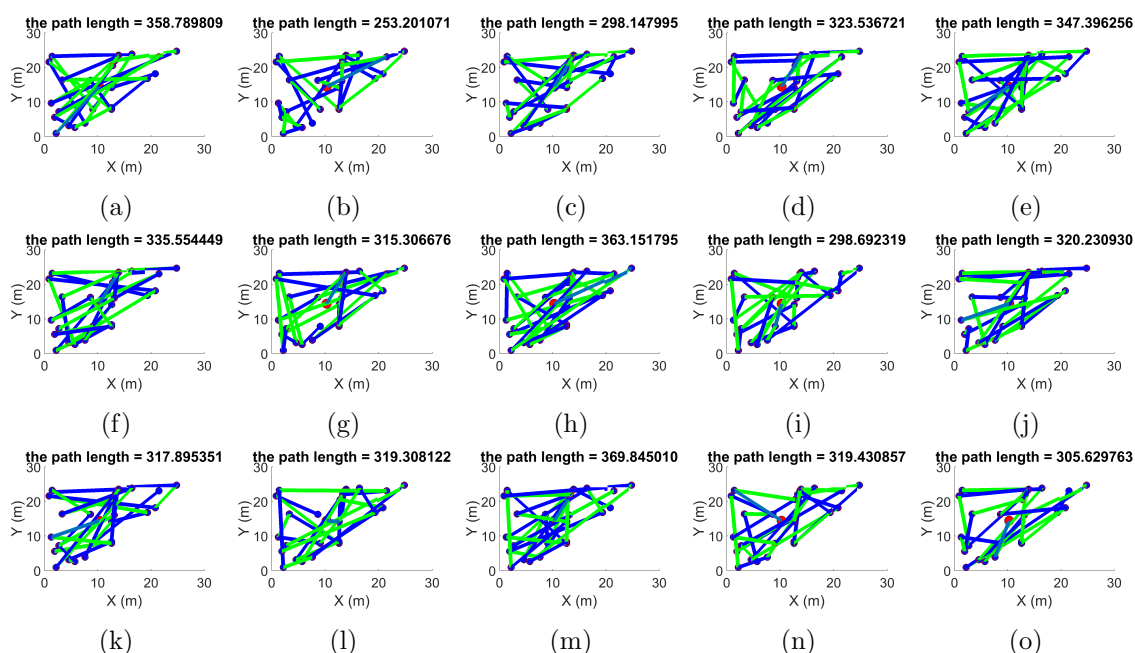


FIGURE 4.8 – Chemins construits en itérations 1–15.

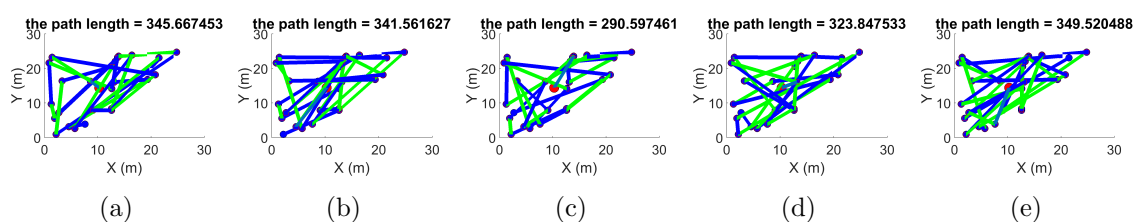


FIGURE 4.9 – Chemins construits en itérations 16–20.

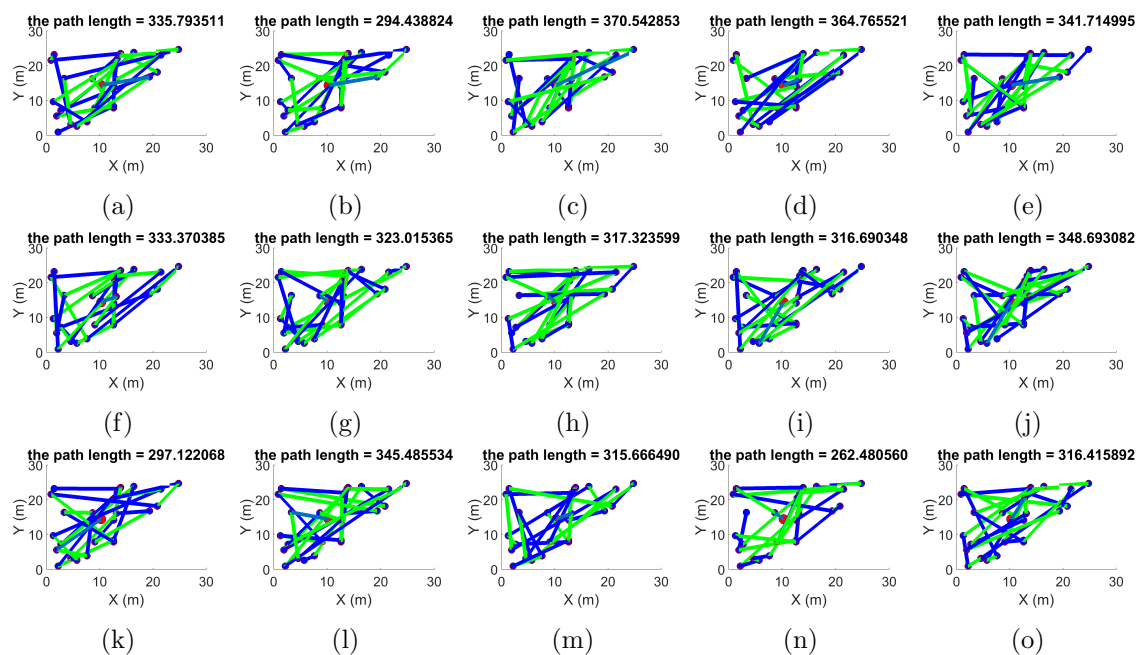


FIGURE 4.10 – Chemins construits en itérations 21 - -35.

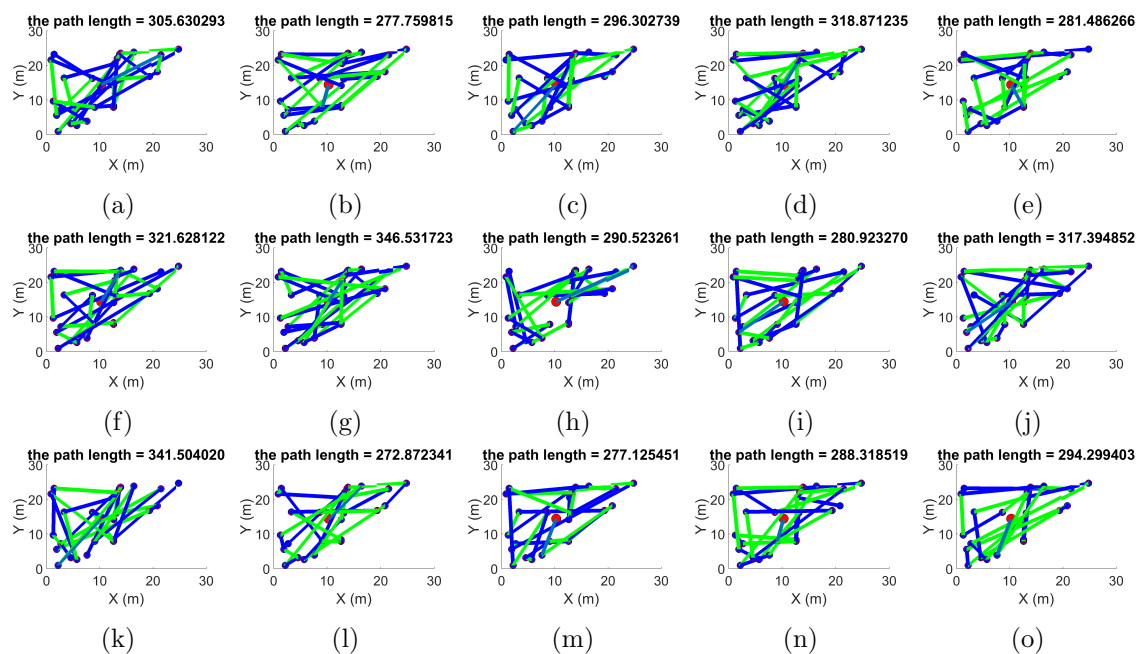


FIGURE 4.11 – Chemins construits en itérations : 36 - -50.

Dans la figure 4.12, l'énergie consommée par chaque capteur augmente presque équitablement pour tous les capteurs.

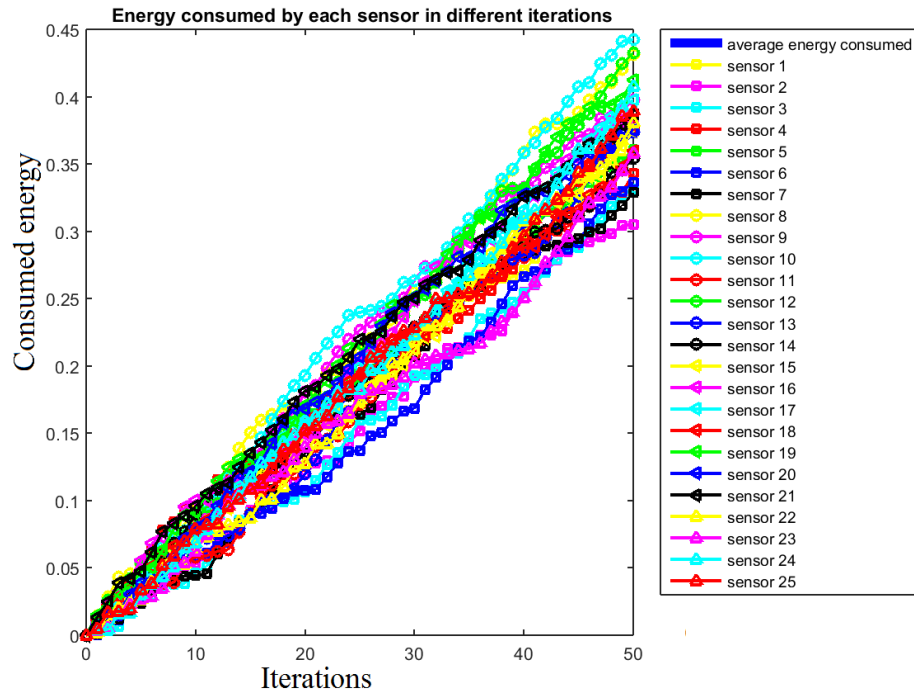


FIGURE 4.12 – Consommation d'énergie par chaque noeud dans chaque itération.

Dans la figure 4.13, l'énergie résiduelle de chaque capteur diminue presque équitablement pour tous les capteurs.

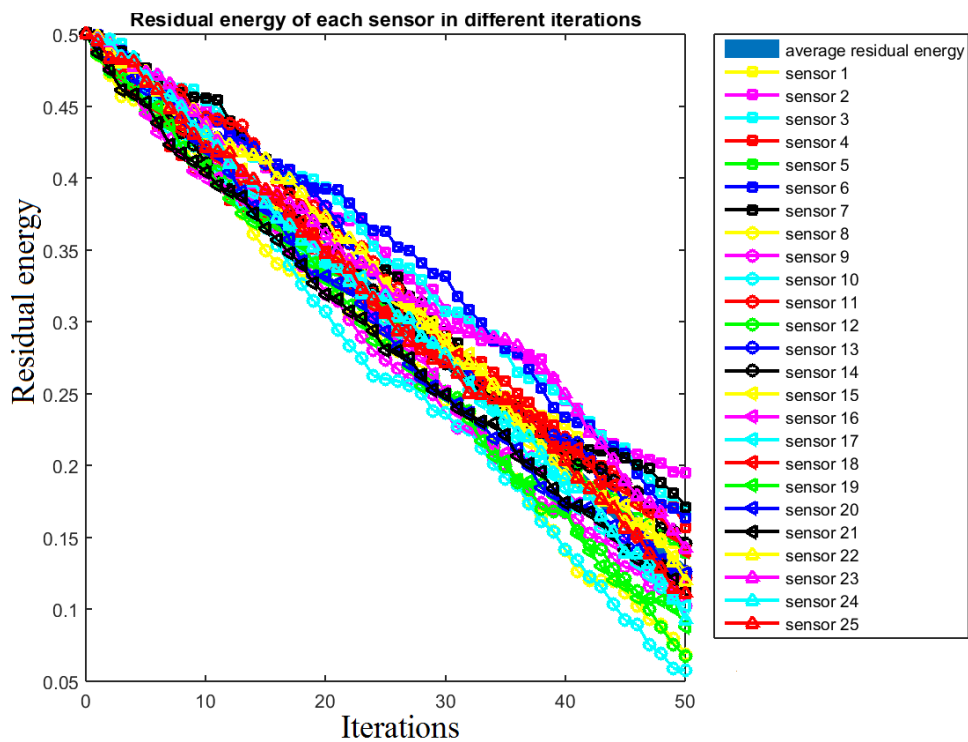


FIGURE 4.13 – Énergie résiduelle de chaque capteur pour 50 itérations.

Dans la figure 4.14, nous avons trié de plus en plus la consommation d'énergie de chaque capteur pour obtenir ces résultats comparables :

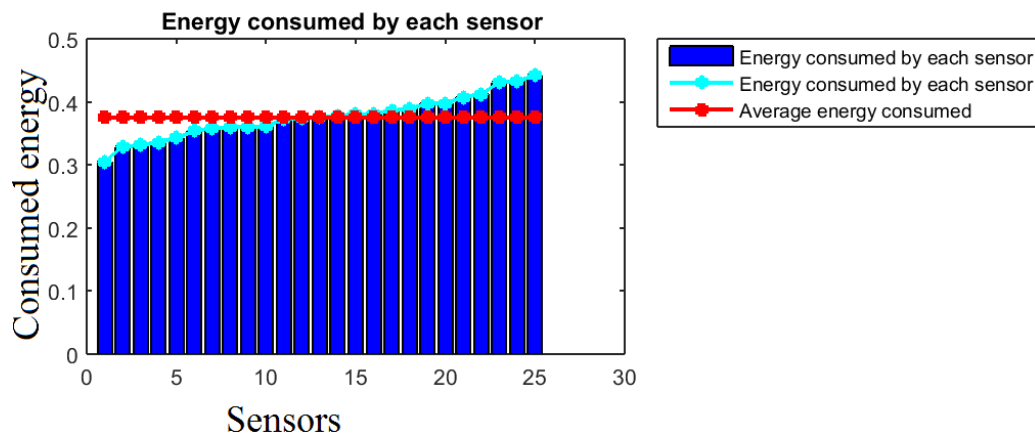


FIGURE 4.14 – Énergie consommée par chaque capteur pour 50 itérations.

L'énergie totale consommée par chaque capteur est presque identique à l'énergie moyenne consommée : $0,3757$ j.

Dans la figure 4.15, nous avons trié de façon décroissante l'énergie résiduelle de chaque capteur pour obtenir ces résultats comparables :

L'énergie résiduelle de chaque capteur est presque la même que l'énergie résiduelle moyenne : 0.1242 j, la différence entre la valeur moyenne et les valeurs maximale et minimale, respectivement, est : 0.07079 j et 0.06663 j.

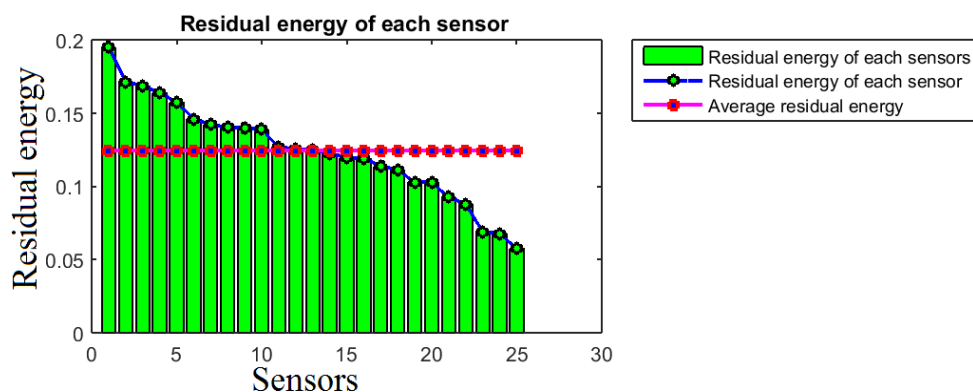


FIGURE 4.15 – Énergie résiduelle de chaque capteur pour 50 itérations.

4.4 Conclusions

Dans ce chapitre, à travers la première section, nous avons mis en place un algorithme de colonies de fourmis. Bien que ce genre d'algorithmes utilise les probabilités pour déterminer les trajets des fourmis à chaque cycle, nous avons dû manipuler un nombre important de constantes pour améliorer les performances de notre algorithme pour résoudre le problème du voyageur de commerce. Il était également nécessaire d'éviter de trouver des solutions non-optimales. Dans les résultats que nous avons obtenus, nous avons toujours obtenu le même résultat (le même circuit hamiltonien), qui pourrait être considéré optimal. Il s'agit peut-être de la seule solution possible, mais pas forcément.

Dans la deuxième section, nous avons proposé un algorithme de routage intelligent (SRA, Smart Routing Algorithm), et ce dernier établit un routage dynamique de réseaux de capteurs sans fil homogènes ; en effet, il est basé sur la phéromone des noeuds et leur probabilité d'être choisi. Dans un premier temps, nous avons examiné l'optimisation de la colonie de fourmis et présenté notre algorithme proposé en utilisant des paramètres universellement utilisés pour évaluer l'efficacité d'une approche donnée. Nous avons distribué 25 capteurs arbitraires avec $0,5$ j d'énergie initiale

pour tous les noeuds, et nous avons mis le puits (SB) au milieu, nous avons validé l'approche proposée (SRA) et nous avons évalué sa performance sur la base d'un ensemble de simulations. Les simulations ont montré que tous les noeuds peuvent être actifs jusqu'à 50 itérations sans aucun noeud mort et ont envoyé un total de 1250 messages, de sorte que les différences de consommation entre eux sont très faibles. Alors, en utilisant l'algorithme SRA, les réseaux de capteurs sans fil auront une longue durée de vie.

Dans les travaux futurs, nous utiliserons des réseaux hétérogènes pour résoudre cette très faible différence de consommation entre les noeuds.

Conclusion

Les développements technologiques modernes ont conduit à l'émergence des appareils miniaturisés à faible consommation avec la capacité de détection, traitement et de communication sans fil. néanmoins, ils souffrent des ressources qui sont limitées, en particulier les sources d'énergie, ils sont actionnés par une batterie dont son remplacement est indésirable voire impossible dans certains cas. Les réseaux constitués de ces noeuds, connus sous le nom de réseaux de capteurs sans fil, attirent beaucoup d'attention des chercheurs dans ce domaine. Les données transmises par ces réseaux sont numériques dans la plupart des cas, telles que la température et l'humidité, et ne nécessitent pas un grand traitement. Alors la majeure partie de cette attention est focalisée sur l'efficacité énergétique de la phase de transmission. Dans l'objectif de réduire la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil et d'augmenter leurs durées de vie, nous avons ces contributions :

- Nous avons contribué en premier lieu par : un algorithme de routage basé sur le théorème de Pythagore généralisé qui permet la sélection de *noeud* suivant de saut suivant pour jouer le rôle de relais jusqu'à la station de base. Pour établir une topologie réaliste basée sur TPG pour les réseaux de capteurs homogènes sans fil.
 - Dans un premier temps, nous avons passé en revue les principales classes de topologie et nous avons présenté quelques paramètres universellement utilisés pour évaluer l'efficacité d'une topologie donnée.
 - Dans un deuxième temps, Nous avons présenté et modélisé notre topologie WSN.
 - Dans un dernier temps, nous avons validé l'approche proposée et nous avons évalué ses performances en fonction d'un ensemble de simulations.
- En deuxième lieu, nous avons proposé et évalué trois méthodes de transmission appelées : S-Rhombus, S-Square, S-Circle pour établir un routage réaliste basé sur une topologie spécifique de réseaux de capteurs sans fil homogènes. Nous avons distribué des capteurs sur les têtes de chaque cellule de table $4 * 4$, et le puits au milieu. Nous avons observé que la distribution des capteurs autour du puits peut prendre la forme d'un carré, d'un rhombe ou d'un cercle, c'est pourquoi nous avons choisi de faire des routes statiques à mesure que ces formes sont obtenues. Nous avons validé l'approche proposée et nous avons évalué ses performances en fonction d'un ensemble de simulations. Les résultats des simulations, basés sur la consommation d'énergie de la première itération et sur le nombre de messages transmis, montrent que la méthode S-Square est la meilleure suivie de la méthode S-Rhombus au deuxième rang tandis que la méthode S-Circle est classée troisième : la méthode S-Square aura une longue durée de vie que les deux autres méthodes.

- En troisième lieu, après que nous avons présenté certains algorithmes intelligents et avons vu leurs apports dans la résolution des problèmes NP-difficiles nous avons décidé de les adapter pour la conception des algorithmes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous optons au début l'algorithme de colonie de fourmis après que nous l'avons testé pour la résolution de problème de voyageur de commerce.

Ainsi, nous avons proposé un algorithme de routage intelligent (SRA, Smart Routing Algorithm), et ce dernier établit un routage dynamique de réseaux de capteurs sans fil homogènes ; en effet, il est basé sur la phéromone des *noeuds* et leur probabilité d'être choisi. Dans un premier temps, nous avons examiné l'optimisation de la colonie de fourmis et présenté notre algorithme proposé en utilisant des paramètres universellement utilisés pour évaluer l'efficacité d'une approche donnée. Nous avons distribué 25 capteurs arbitraires avec 0,5 j d'énergie initiale pour tous les *noeuds*, et nous avons mis le puits au milieu, nous avons validé l'approche proposée (SRA) et nous avons évalué sa performance sur la base d'un ensemble de simulations. Les simulations ont montré que tous les *noeuds* peuvent être actifs jusqu'à 50 itérations sans *noeuds* morts et ont envoyé un total de 1250 messages, de sorte que les différences de consommation entre eux sont très faibles. Donc, en utilisant l'algorithme SRA, les réseaux de capteurs sans fil auront une longue durée de vie.

Perspectives

- Dans le travail actuel, nous avons traité les réseaux homogènes, il est important d'adapter nos contributions au réseau hétérogènes, l'utilisation des réseaux hétérogènes pour résoudre la très faible différence de consommation entre les *noeuds* dans notre dernière contribution.
- Dans ce travail nous avons supposé que les *noeuds* sont statiques sans mouvement, donc l'intégration de mobilité des *noeuds* et/ou la Station de Base donne un autre aspect qui pourrait prolonger les travaux effectués.
- La théorie des jeux peut être aussi intégrée pour la conception des algorithmes de routage et surtout dans le choix de prochain *noeud* voisin et/ou saut suivant.
- Nous nous sommes inspirés de colonie de fourmis dans l'une de nos contributions, d'autres solutions métaheuristiques peuvent être aussi envisagées pour les futurs travaux.
- Une solution hybride entre nos contributions ou l'une de nos contributions et d'autres solutions en littérature est aussi envisagée.
- Nous avons utilisé dans la distribution des *noeuds* un espace à deux dimensions, il serait nécessaire d'utiliser une zone à trois dimensions.



BIBLIOGRAPHIE

- [AB07] Gergely Acs and Levente Buttyán. A taxonomy of routing protocols for wireless sensor networks. *BUTE Telecommunication department*, pages 32–40, 2007.
- [AGCV08] Cláudia Barenco Abbas, Ricardo González, Nelson Cardenas, and LJ García Villalba. A proposal of a wireless sensor network routing protocol. *Telecommunication Systems*, 38(1-2) :61–68, 2008.
- [AGKL05] Nael Abu-Ghazaleh, Kyoung-Don Kang, and Ke Liu. Towards resilient geographic routing in wsns. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Quality of service & security in wireless and mobile networks*, pages 71–78. ACM, 2005.
- [AKK04] Jamal N Al-Karaki and Ahmed E Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks : a survey. *IEEE wireless communications*, 11(6) :6–28, 2004.
- [AM01] DP Agarwal and A Manjeshwar. Teen : a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. *IEEE, San Francisco*, 2001.
- [ASK08] Mahmood Ali and Ravula Sai Kumar. Real-time support and energy efficiency in wireless sensor networks, 2008.
- [ASSC02a] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications magazine*, 40(8) :102–114, 2002.
- [ASSC02b] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer networks*, 38(4) :393–422, 2002.
- [AY05] Kemal Akkaya and Mohamed Younis. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 3(3) :325–349, 2005.
- [AYY02] Khaled Arisha, Moustafa Youssef, and Mohamed Younis. Energy-aware tdma-based mac for sensor networks. In *System-level power optimization for wireless multimedia communication*, pages 21–40. Springer, 2002.
- [BB14] Ritwik Banerjee and Chandan Kr Bhattacharyya. Cluster based routing algorithm with evenly load distribution for large scale networks. In *Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2014 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2014.
- [BK12] A Attea BaraaĀŽa and Enan A Khalil. A new evolutionary based routing protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. *Applied Soft Computing*, 12(7) :1950–1957, 2012.
- [BLMB06] Julio Barbancho, Carlos León, Javier Molina, and Antonio Barbancho. Sir : A new wireless sensor network routing protocol based on artificial intelligence. In *Asia-Pacific Web Conference*, pages 271–275. Springer, 2006.

- [BSA16] Saleh Bouarafa, Rachid Saadane, and Driss Aboutajdine. Reduction of energy consumption in wsn using the generalized pythagorean theorem. In *Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2016 5th International Conference on*, pages 720–725. IEEE, 2016.
- [BSRA17] Saleh Bouarafa, Rachid Saadane, Moulay Driss Rahmani, and Driss Aboutajdine. Study of energy consumption in wireless sensor networks using s-rhombus, s-square and s-circle deployment. In *International Symposium on Ubiquitous Networking*, pages 402–410. Springer, 2017.
- [BTN10] Ankana Boondirek, Wannapong Triampo, and Narin Nuttavut. A review of cellular automata models of tumor growth. In *International Mathematical Forum*, volume 5, pages 3023–3029. Citeseer, 2010.
- [CE02] Alberto Cerpa and Deborah Estrin. Ascent : Adaptive self-configuring sensor network topologies. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 32(1) :62–62, 2002.
- [CMN11] Ayon Chakraborty, Swarup Kumar Mitra, and Mrinal Kanti Naskar. A genetic algorithm inspired routing protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Computational Intelligence Theory and Practice*, 6(1) :1–8, 2011.
- [CT04] Jae-Hwan Chang and Leandros Tassiulas. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on networking*, 12(4) :609–619, 2004.
- [DB11] Marco Dorigo and Mauro Birattari. Ant colony optimization. In *Encyclopedia of machine learning*, pages 36–39. Springer, 2011.
- [DEG⁺01] Lance Doherty, Laurent El Ghaoui, et al. Convex position estimation in wireless sensor networks. In *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1655–1663. IEEE, 2001.
- [DG97] Marco Dorigo and Luca Maria Gambardella. Ant colony system : a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 1(1) :53–66, 1997.
- [dRMA⁺12] Denis do Rosário, Kássio Machado, Antônio Abelém, Dionne Monteiro, and Eduardo Cerqueira. Recent advances and challenges in wireless multimedia sensor networks. In *Mobile Multimedia-User and Technology Perspectives*. InTech, 2012.
- [DWM09] Zhou DENG, Guo-Jun WANG, and Zheng MA. A leaping-based routing protocol with load balancing support in wireless sensor networks [j]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 3 :022, 2009.
- [EGHK99] Deborah Estrin, Ramesh Govindan, John Heidemann, and Satish Kumar. Next century challenges : Scalable coordination in sensor networks. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 263–270. ACM, 1999.
- [EY15] Riham SY Elhabyan and Mustapha CE Yagoub. Two-tier particle swarm optimization protocol for clustering and routing in wireless sensor network. *Journal of Network and Computer Applications*, 52 :116–128, 2015.

- [FRZ⁺05] Rodrigo Fonseca, Sylvia Ratnasamy, Jerry Zhao, Cheng Tien Ee, David Culler, Scott Shenker, and Ion Stoica. Beacon vector routing : Scalable point-to-point routing in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd Conference on Symposium on Networked Systems Design & Implementation-Volume 2*, pages 329–342. USENIX Association, 2005.
- [GDV14] Nitin Goyal, Mayank Dave, and Anil Kumar Verma. Fuzzy based clustering and aggregation technique for under water wireless sensor networks. In *Electronics and Communication Systems (ICECS), 2014 International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2014.
- [GFC11] Jia Guo, Jian’an Fang, and Xuemin Chen. Survey on secure data aggregation for wireless sensor networks. In *Service Operations, Logistics, and Informatics (SOLI), 2011 IEEE International Conference on*, pages 138–143. IEEE, 2011.
- [HCB00] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *System sciences, 2000. Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on*, pages 10–pp. IEEE, 2000.
- [HCB02] Wendi B Heinzelman, Anantha P Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 1(4) :660–670, 2002.
- [HDR⁺15] Yi-Fan Hu, Yong-Sheng Ding, Li-Hong Ren, Kuang-Rong Hao, and Hua Han. An endocrine cooperative particle swarm optimization algorithm for routing recovery problem of wireless sensor networks with multiple mobile sinks. *Information Sciences*, 300 :100–113, 2015.
- [HF10] Tiansi Hu and Yunsi Fei. Qelar : A machine-learning-based adaptive routing protocol for energy-efficient and lifetime-extended underwater sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 9(6) :796–809, 2010.
- [HJK13] Seung-Wan Han, In-Seon Jeong, and Seung-Ho Kang. Low latency and energy efficient routing tree for wireless sensor networks with multiple mobile sinks. *Journal of Network and Computer Applications*, 36(1) :156–166, 2013.
- [Hol92] John Henry Holland. *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press, 1992.
- [HWL⁺11] Chenn-Jung Huang, Yu-Wu Wang, Hsiu-Hui Liao, Chin-Fa Lin, Kai-Wen Hu, and Tun-Yu Chang. A power-efficient routing protocol for underwater wireless sensor networks. *Applied Soft Computing*, 11(2) :2348–2355, 2011.
- [IA07] Salama Ikki and Mohamed H Ahmed. Performance analysis of cooperative diversity wireless networks over nakagami-m fading channel. *IEEE Communications letters*, 11(4), 2007.
- [IGE00] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Directed diffusion : A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 56–67. ACM, 2000.

- [IHL08] Ahmed S Ibrahim, Zhu Han, and KJ Ray Liu. Distributed energy-efficient cooperative routing in wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(10) :3930–3941, 2008.
- [Ila01] Andrew Ilachinski. *Cellular automata : a discrete universe*. World Scientific Publishing Company, 2001.
- [JM14] Sara Zafar Jafarzadeh and Mohammad Hossein Yaghmaee Moghaddam. Design of energy-aware qos routing algorithm in wireless sensor networks using reinforcement learning. In *Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), 2014 4th International eConference on*, pages 722–727. IEEE, 2014.
- [Kac09] Rahim Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, 2009.
- [KAMZ07] Amir Ehsan Khandani, Jinane Abounadi, Eytan Modiano, and Lizhong Zheng. Cooperative routing in static wireless networks. *IEEE Transactions on Communications*, 55(11) :2185–2192, 2007.
- [KAZ⁺15] Farzad Kiani, Ehsan Amiri, Mazdak Zamani, Touraj Khodadadi, and Azizah Abdul Manaf. Efficient intelligent energy routing protocol in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(3) :618072, 2015.
- [Ken11] James Kennedy. Particle swarm optimization. In *Encyclopedia of machine learning*, pages 760–766. Springer, 2011.
- [KEW02a] Bhaskar Krishnamachari, Deborah Estrin, and Stephen Wicker. Modelling data-centric routing in wireless sensor networks. In *IEEE infocom*, volume 2, pages 39–44, 2002.
- [KEW02b] L Krishnamachari, Deborah Estrin, and Stephen Wicker. The impact of data aggregation in wireless sensor networks. In *Distributed Computing Systems Workshops, 2002. Proceedings. 22nd International Conference on*, pages 575–578. IEEE, 2002.
- [KGKS05] Young-Jin Kim, Ramesh Govindan, Brad Karp, and Scott Shenker. Geographic routing made practical. In *Proceedings of the 2nd conference on Symposium on Networked Systems Design & Implementation-Volume 2*, pages 217–230. USENIX Association, 2005.
- [KGV83] Scott Kirkpatrick, C Daniel Gelatt, and Mario P Vecchi. Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598) :671–680, 1983.
- [KJ14] Pratyay Kuila and Prasanta K Jana. Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks : Particle swarm optimization approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 33 :127–140, 2014.
- [KKW⁺03] Martin Kubisch, Holger Karl, Adam Wolisz, Lizhi Charlie Zhong, and Jan Rabaey. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks. In *Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE*, volume 1, pages 558–563. IEEE, 2003.
- [KLM96] Leslie Pack Kaelbling, Michael L Littman, and Andrew W Moore. Reinforcement learning : A survey. *Journal of artificial intelligence research*, 4 :237–285, 1996.
- [KM12] R Kaura and S Majithia. Efficient end to end routing using rssi and simulated annealing. *Int. J. Eng. Res. Technol*, 1 :1–5, 2012.

- [KP03] Intae Kang and Radha Poovendran. Maximizing static network lifetime of wireless broadcast ad hoc networks. In *Communications, 2003. ICC'03. IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2256–2261. IEEE, 2003.
- [KRR12] Nenad Kojić, Irini Reljin, and Branimir Reljin. A neural networks-based hybrid routing protocol for wireless mesh networks. *Sensors*, 12(6) :7548–7575, 2012.
- [KT11] Ajith Kumar and S Ganesh Thorenoor. Analysis of ip network for different quality of service. In *International Symposium on Computing, Communication, and Control (ISCCC 2009) Proc. of CSIT*, volume 1, 2011.
- [KW07] Holger Karl and Andreas Willig. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2007.
- [LH05] Ning Li and Jennifer C Hou. Blmst : a decentralized, power-efficient broadcast algorithm for wireless sensor networks. in *ACM Baltzer Wireless Networks (WINET)*, 2005.
- [LLH13] Kuen-Han Li, Jenq-Shiou Leu, and Jiri Hoek. Ant-based on-demand clustering routing protocol for mobile ad-hoc networks. In *Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS), 2013 Seventh International Conference on*, pages 354–359. IEEE, 2013.
- [LR02] Stephanie Lindsey and Cauligi S Raghavendra. Pegasus : Power-efficient gathering in sensor information systems. In *Aerospace conference proceedings, 2002. IEEE*, volume 3, pages 3–3. IEEE, 2002.
- [LSL⁺04] Jerome Peter Lynch, Arvind Sundararajan, Kincho H Law, Anne S Kiremidjian, and Ed Carrier. Embedding damage detection algorithms in a wireless sensing unit for operational power efficiency. *Smart Materials and Structures*, 13(4) :800, 2004.
- [LT14] L Lakshmanan and DC Tomar. Optimizing localization route using particle swarm-a genetic approach. *American Journal of Applied Sciences*, 11(3) :520, 2014.
- [MCB13] Mohamed Maalej, Sofiane Cherif, and Hichem Besbes. Qos and energy aware cooperative routing protocol for wildfire monitoring wireless sensor networks. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013.
- [MDO⁺10] Sudip Misra, Sanjay K Dhurandher, Mohammad S Obaidat, Pushkar Gupta, Karan Verma, and Prayag Narula. An ant swarm-inspired energy-aware routing protocol for wireless ad-hoc networks. *Journal of systems and software*, 83(11) :2188–2199, 2010.
- [MHHG12] Liao Ming-Hua, Zhang Hua, and Sun Guang. Energy aware routing algorithm for wireless sensor network based on ant colony principle. *JCIT : Journal of Convergence Information Technology*, 7(4) :215–221, 2012.
- [MN12] Anjum A Mohammed and Gihan Nagib. Optimal routing in ad-hoc network using genetic algorithm. *Int. J. Advanced Networking and Applications*, 3(05) :1323–1328, 2012.
- [MP43] Warren S McCulloch and Walter Pitts. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4) :115–133, 1943.

- [MRR⁺53] Nicholas Metropolis, Arianna W Rosenbluth, Marshall N Rosenbluth, Augusta H Teller, and Edward Teller. Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics*, 21(6) :1087–1092, 1953.
- [MWQ⁺07] Yun Mao, Feng Wang, Lili Qiu, Simon S Lam, and Jonathan M Smith. S4 : Small state and small stretch routing protocol for large wireless sensor networks. In *NSDI*, volume 7, pages 101–114, 2007.
- [OMPL12] Guido Oddi, Donato Macone, Antonio Pietrabissa, and Francesco Liberati. A proactive link-failure resilient routing protocol for manets based on reinforcement learning. In *Control & Automation (MED), 2012 20th Mediterranean Conference on*, pages 1259–1264. IEEE, 2012.
- [QKX02] Hairong Qi, Phani Teja Kuruganti, and Yingyue Xu. The development of localized algorithms in wireless sensor networks. *Sensors*, 2(7) :286–293, 2002.
- [QXW03] Hairong Qi, Yingyue Xu, and Xiaoling Wang. Mobile-agent-based collaborative signal and information processing in sensor networks. *Proceedings of the IEEE*, 91(8) :1172–1183, 2003.
- [RC13] Vitor G Rolla and Marilia Curado. A reinforcement learning-based routing for delay tolerant networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(10) :2243–2250, 2013.
- [RM99] Volkan Rodoplu and Teresa H Meng. Minimum energy mobile wireless networks. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 17(8) :1333–1344, 1999.
- [RRZ15] Md Mahfuz Reza, Kazi Tiomour Rahman, and ASM Zakaria. Grid based fuzzy optimized routing protocol for underwater sensor networks. *International Journal of Computer Applications*, 112(7), 2015.
- [RT99] Elizabeth M Royer and Chai-Keong Toh. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. *IEEE personal communications*, 6(2) :46–55, 1999.
- [SB98] Richard S Sutton and Andrew G Barto. *Reinforcement learning : An introduction*, volume 1. MIT press Cambridge, 1998.
- [SCB02] Peter Sloot, Fan Chen, and Charles Boucher. Cellular automata model of drug therapy for hiv infection. In *International Conference on Cellular Automata*, pages 282–293. Springer, 2002.
- [SD02] Thomas Stutzle and Marco Dorigo. A short convergence proof for a class of ant colony optimization algorithms. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 6(4) :358–365, 2002.
- [SGP⁺07] W Schott, A Gluhak, M Presser, U Hunkeler, and R Tafazolli. e-sense protocol stack architecture for wireless sensor networks. In *Mobile and Wireless Communications Summit, 2007. 16th IST*, pages 1–5. IEEE, 2007.
- [SH12] Mansour Sheikhan and Ehsan Hemmati. Transient chaotic neural network-based disjoint multipath routing for mobile ad-hoc networks. *Neural Computing and Applications*, 21(6) :1403–1412, 2012.

- [SLG12] Shuo Shi, Xinning Liu, and Xuemai Gu. An energy-efficiency optimized leach-c for wireless sensor networks. In *Communications and Networking in China (CHINA-COM), 2012 7th International ICST Conference on*, pages 487–492. IEEE, 2012.
- [SR98] Suresh Singh and Cauligi S Raghavendra. Pamasã power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 28(3) :5–26, 1998.
- [SR02] Rahul C Shah and Jan M Rabaey. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE*, volume 1, pages 350–355. IEEE, 2002.
- [SS01] Curt Schurgers and Mani B Srivastava. Energy efficient routing in wireless sensor networks. In *Military communications conference, 2001. MILCOM 2001. Communications for network-centric operations : Creating the information force. IEEE*, volume 1, pages 357–361. IEEE, 2001.
- [SSS10] Shio Kumar Singh, MP Singh, and DK Singh. A survey of energy-efficient hierarchical cluster-based routing in wireless sensor networks. *International Journal of Advanced Networking and Application (IJANA)*, 2(02) :570–580, 2010.
- [ST12] Snehal Sarangi and Biju Thankchan. A novel routing algorithm for wireless sensor network using particle swarm optimization. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSRJCE)*, 4(1) :26–30, 2012.
- [Sub04] Nalin VimalKumar Subramanian. Survey on energy-aware routing and routing protocols for sensor networks. *Technical Report, Computer Science*, 2004.
- [TA05] Chris Townsend and Steven Arms. Wireless sensor networks. *MicroStrain, Inc*, 20(9) :15–21, 2005.
- [TdF96] Tânia Tomé and JR Drugowich de Felício. Probabilistic cellular automaton describing a biological immune system. *Physical Review E*, 53(4) :3976, 1996.
- [TLA⁺15] Moeenuddin Tariq, Muhammad Shafie Abd Latiff, Muhammad Ayaz, Yahaya Coulibaly, and Nadera Al-Areqi. Distance based reliable and energy efficient (dree) routing protocol for underwater acoustic sensor networks. *JNW*, 10(5) :311–321, 2015.
- [TMP18] Eirini Eleni Tsiropoulou, Giorgos Mitsis, and Symeon Papavassiliou. Interest-aware energy collection & resource management in machine to machine communications. *Ad Hoc Networks*, 68 :48–57, 2018.
- [TP05] Ben L Titzer and Jens Palsberg. Nonintrusive precision instrumentation of micro-controller software. In *ACM SIGPLAN Notices*, volume 40, pages 59–68. ACM, 2005.
- [VKR⁺05] Iuliu Vasilescu, Keith Kotay, Daniela Rus, Matthew Dunbabin, and Peter Corke. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network. In *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 154–165. ACM, 2005.
- [WALR⁺06] Geoffrey Werner-Allen, Konrad Lorincz, Mario Ruiz, Omar Marcillo, Jeff Johnson, Jonathan Lees, and Matt Welsh. Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE internet computing*, 10(2) :18–25, 2006.

- [WCS⁺12] Huafeng Wu, Xinqiang Chen, Chaojian Shi, Yingjie Xiao, and Ming Xu. An aco-afsa fusion routing algorithm for underwater wireless sensor network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 8(5) :920505, 2012.
- [Wol02] Stephen Wolfram. *A new kind of science*, volume 5. Wolfram media Champaign, 2002.
- [XHE01] Ya Xu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 70–84. ACM, 2001.
- [YCCV11] Yun-Sheng Yen, Han-Chieh Chao, Ruay-Shiung Chang, and Athanasios Vasilakos. Flooding-limited and multi-constrained qos multicast routing based on the genetic algorithm for manets. *Mathematical and Computer Modelling*, 53(11-12) :2238–2250, 2011.
- [YGE01] Yan Yu, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Geographical and energy aware routing : A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. 2001.
- [YGY11] Jian-Feng Yan, Yang Gao, and Lu Yang. Ant colony optimization for wireless sensor networks routing. In *Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), 2011 International Conference on*, volume 1, pages 400–403. IEEE, 2011.
- [YYA02] Mohamed Younis, Moustafa Youssef, and Khaled Arisha. Energy-aware routing in cluster-based sensor networks. In *Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems, 2002. MASCOTS 2002. Proceedings. 10th IEEE International Symposium on*, pages 129–136. IEEE, 2002.
- [Zad65] Lofti A Zadeh. Information and control. *Fuzzy sets*, 8(3) :338–353, 1965.
- [ZAS12] Adamu Murtala Zungeru, Li-Minn Ang, and Kah Phooi Seng. Classical and swarm intelligence based routing protocols for wireless sensor networks : A survey and comparison. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(5) :1508–1536, 2012.
- [ZRLM09] Kai Zeng, Kui Ren, Wenjing Lou, and Patrick J Moran. Energy aware efficient geographic routing in lossy wireless sensor networks with environmental energy supply. *Wireless Networks*, 15(1) :39–51, 2009.
- [ZXL12] Fuzhe Zhao, You Xu, and Ru Li. Improved leach routing communication protocol for a wireless sensor network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 8(12) :649609, 2012.