



THÈSE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ SULTAN MOULAY SLIMANE

Faculté des Sciences et Techniques-Béni Mellal

Laboratoire de Traitement de l'Information et Aide à la Décision

Spécialité : "Informatique"

Présentée par :

Alaa AADRI

le 16/01/2021

Protocoles de routage Ad hoc, vers une approche de minimisation de l'énergie consommée dans les RCSF

Directrice de Thèse : **Pr. Najlae IDRISSE**

Devant le jury composé de :

Monsieur Said RAGHAY	PES, FSTG Marrakech	Rapporteur / Président
Monsieur Benayad NSIRI	PES, ENSAM Rabat	Rapporteur
Monsieur Abdellatif HAIR	PES, FST Béni Mellal	Rapporteur
Monsieur Mohammed ERRITALI	PH, FST Béni Mellal	Examineur
Monsieur Yassine SADQI	PA, FP Béni Mellal	Invité
Madame Najlae IDRISSE	PH, FST Béni Mellal	Encadrante

FICHE PRESENTATIVE DE LA THÈSE

Thèse :

Intitulé du travail :

Protocoles de routage Ad hoc, vers une approche de minimisation de l'énergie consommée dans les RCSF

Période de réalisation du travail de thèse : 5 ans

Doctorant :

Nom et prénom de l'auteur : AADRI Alaa

Lieu de réalisation des travaux de recherche :

Laboratoire de Technologie de l'Information et d'Aide à la Décision (TIAD), Faculté des Sciences et Techniques, Béni Mellal

Encadrant :

Nom, prénom et grade : IDRISSI Najlae, PES

Laboratoire et institution :

Laboratoire de Technologie de l'Information et d'Aide à la Décision (TIAD), Faculté des Sciences et Techniques, Béni Mellal

Remerciements

La satisfaction qui accompagne l'accomplissement réussi d'une tâche serait incomplète sans mentionner les personnes qui la rendent possible.

Avec mes sincères salutations et mon profond respect, je remercie tout d'abord ma directrice de thèse, Madame Najlae IDRISSI, sous la supervision de qui, j'ai eu le privilège de mener à bien mes travaux de recherche, j'exprime ma profonde gratitude pour son soutien total et ses précieux conseils pour aborder un problème de recherche et être persévérant pour atteindre mon objectif durant mes études doctorales. Travailler sous sa supervision a été une expérience très enrichissante et mémorable et sans son aide, il aurait été impossible d'achever mon doctorat.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous mes professeurs dont l'aide et les encouragements constants ont renforcé mon moral et ma confiance, leurs précieuses suggestions et idées nous ont donné une grande marge de manœuvre et une grande flexibilité pour travailler de la meilleure façon possible dans le but d'atteindre les objectifs de cette thèse. Je suis également reconnaissant à tous les autres membres du corps professoral pour leur soutien, leurs encouragements et leur disponibilité.

Mes remerciements s'adressent également à mes collègues du laboratoire TIAD et mes amis de la Faculté des Sciences et Techniques pour le plaisir qu'ils ont partagé avec moi ainsi que tous ceux qui nous ont aidés directement ou indirectement dans la réalisation de ce projet de thèse.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à ma famille pour leur amour et leur soutien à toutes les étapes de mes études. Je remercie également mon épouse et mes parents pour leur soutien indéfectible, leurs soins désintéressés et leurs chaleureux encouragements qui ont apporté beaucoup d'inspiration et de bonheur dans ma vie et notamment le long de ces années de Thèse riches en bouleversements.

Résumé

De nos jours, la communication sans fil est l'une des technologies qui connaît la croissance la plus rapide au monde en raison des progrès récents des appareils informatiques mobiles et de la technologie sans fil. Les réseaux de capteurs sans fils sont des réseaux à sauts multiples où les nœuds capteurs sont constitués de petits dispositifs électroniques capables de détecter, calculer et transmettre des données à partir d'environnements physiques hostiles sans aucune maintenance. Ces nœuds capteurs sont alimentés par des piles dont toute manipulation manuelle pour les recharger ou les changer est inconcevable et demeure presque impossible. Pour assurer un fonctionnement optimal et la longévité du réseau, la contrainte de l'énergie consommée doit être considérée comme un facteur majeur dans le déploiement de ces réseaux.

Les protocoles de routage peuvent être conçus de manière à permettre une utilisation efficace de des ressources énergétiques d'un nœud capteur et garantir l'efficacité de l'exploitation en temps réel. Cette thèse porte principalement sur l'étude de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil notamment dans la phase de communication de données et vise à proposer de nouvelles stratégies de routage efficaces en énergie afin de prolonger la durée de fonctionnement de ces réseaux. Nous portons une étude détaillée sur les protocoles de routage Ad hoc les plus connus afin de proposer dans une deuxième partie deux nouveaux protocoles de routage permettant d'optimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil tout en assurant une bonne qualité de service.

Mots clés : Réseaux Ad hoc, RCSF, Consommation d'énergie, Protocoles de routage, Simulateur de réseaux, Qualité de service, Métriques de performance.

Abstract

Nowadays, wireless communication is one of the fastest growing technologies in the world due to recent advances in mobile computing devices and wireless technology. Wireless sensor networks are multi-hop networks where the sensor nodes are small electronic devices capable of detecting, computing and transmitting data from harsh physical environments without any maintenance. These sensor nodes are powered by batteries that are inconceivable and almost impossible to recharge or change manually. To ensure optimal operation and longevity of the network, the constraint of the energy consumed must be considered as a major factor in the deployment of these networks.

Routing protocols can be designed to allow efficient use of the energy resources of a sensor node and ensure efficient real-time operation. This thesis focuses on the efficient use of energy in wireless sensor networks, and aims to propose new energy-efficient routing strategies to extend the lifetime of these networks. We are carrying out a detailed study on the most common Ad hoc routing protocols in order to propose, in a second part, two new routing protocols to optimize power consumption in wireless sensor networks while ensuring a good quality of service.

Keywords: Ad hoc networks, WSN, Energy consumption, Routing protocols, Network simulator, Quality of service, Performance metrics.

Table des matières

Remerciements.....	3
Résumé.....	4
Abstract.....	5
Table des matières.....	6
Liste des figures.....	11
Liste des tables.....	13
Liste des abréviations.....	14
Liste des notations.....	16
Introduction générale.....	17
Problématique et contributions de cette thèse.....	18
Propriétés et hypothèses.....	19
Organisation du manuscrit.....	20
1 Chapitre 1 : Introduction aux réseaux Ad hoc et aux réseaux de capteurs sans fil.....	23
1.1 Introduction.....	23
1.2 Les réseaux mobiles Ad hoc (MANET).....	24
1.2.1 Le modèle de référence OSI et modèle TCP/IP.....	24
1.2.2 Définition des réseaux mobiles Ad hoc.....	25
1.2.3 Caractéristiques des MANET.....	26
1.2.4 Contraintes des MANET.....	27
1.2.5 Le routage de données dans les MANET.....	29
1.2.5.1 Les protocoles proactifs.....	30
1.2.5.2 Les protocoles réactifs.....	31
1.2.5.3 Les protocoles hybrides.....	31
1.3 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF).....	32
1.3.1 Introduction aux RCSF.....	32
1.3.2 Le déploiement des nœuds capteurs.....	33
1.3.3 Principaux composants d'un RCSF typique.....	34
1.3.4 Applications des RCSF.....	34
1.3.4.1 Applications médicales.....	35
1.3.4.2 Applications dans l'environnement et l'agriculture.....	36
1.3.4.3 Applications militaires et d'urgence.....	36
1.3.4.4 Application dans le bâtiment.....	37

1.3.4.5	Applications dans l'industrie	37
1.3.4.6	Systèmes de transport	37
1.3.4.7	Réseaux de capteurs souterrains et sous-marins	38
1.3.5	Composition des RCSF.....	38
1.3.6	Modélisation graphique des RCSF	40
1.3.7	Pile protocolaire des RCSF.....	40
1.3.8	Exigences et paramètres d'implémentation des RCSF.....	41
1.3.9	Topologie des RCSF	43
1.3.10	Agrégation de données dans les RCSF	44
1.4	Le routage dans les RCSF	45
1.4.1	Protocoles de routage basés sur la structure du réseau.....	46
1.4.1.1	Routage à plat.....	46
1.4.1.2	Routage basé sur la localisation	46
1.4.1.3	Routage hiérarchique.....	47
1.4.2	Protocoles de routage basés sur les opérations.....	47
1.4.2.1	Routage basé sur la négociation.....	47
1.4.2.2	Protocoles de routage basés sur des chemins multiples	47
1.4.2.3	Protocoles de routage basés sur des requêtes.....	47
1.4.2.4	Routage basé sur la QoS.....	48
1.4.2.5	Routage basé sur la cohérence.....	49
1.4.3	Autres classifications des protocoles de routages des RCSF	49
1.5	La couche MAC.....	50
1.5.1	Protocoles MAC basés sur la programmation	50
1.5.2	Protocoles MAC basés sur la contention	52
1.5.3	Protocoles MAC hybrides.....	53
1.5.3.1	La normalisation des protocoles pour les RCSF.....	55
1.5.3.2	Conclusion	56
2	Chapitre 2 : La consommation d'énergie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF).....	59
2.1	Introduction	59
2.2	Définition de la durée de vie du réseau et de l'efficacité énergétique	59
2.2.1	Durée de vie du réseau basée sur le nombre de nœuds vivants	60
2.2.2	Durée de vie du réseau basée sur la couverture	60
2.2.3	Durée de vie du réseau basée sur la connectivité.....	60

2.2.4	Durée de vie du réseau en fonction des exigences de l'application.....	61
2.3	Les causes de perte d'énergie dans les RCSF	61
2.4	Les mécanismes et techniques d'efficacité énergétique dans les RCSF	62
2.4.1	La réduction des données produites	63
2.4.2	La réduction de la surcharge du protocole	63
2.4.3	Le routage efficace en énergie	64
2.4.4	Le duty cycling (ou cycle de fonctionnement).....	64
2.4.5	Contrôle de la topologie.....	64
2.5	Les approches de réduction de la consommation d'énergie dans les RCSF	65
2.5.1	La réduction des données envoyées.....	65
2.5.2	L'optimisation radio.....	67
2.5.3	Les schémas de mise en veille/réveil	68
2.5.4	Routage efficace sur le plan énergétique	69
2.5.5	Rechargement des batteries	71
2.6	Etat de l'art sur les protocoles de routage efficaces en énergie.....	73
2.7	Conclusions et remarques	75
3	Chapitre 3 : Contribution 1: Etude comparative avancée des performances des protocoles de routage Ad hoc	77
3.1	Introduction	77
3.2	Méthodologie de la recherche et d'analyse	77
3.3	Les indicateurs de mesure de performance des réseaux	78
3.4	Modélisation des MANET	79
3.5	Classification et étude détaillée des protocoles de routage MANET	80
3.5.1	DSR (Dynamic Source Routing).....	81
3.5.2	OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)	82
3.5.3	AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector)	84
3.5.4	DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector).....	86
3.5.5	ZRP (Zone routing protocol)	88
3.5.6	GRP (Geographic Routing protocol).....	90
3.6	Le simulateur OPNET	90
Paramètres.....		91
Valeurs.....		91
3.7	Résultats de la simulation.....	92

3.7.1	Premier scénario.....	92
3.7.1.1	Charge du trafic	93
3.7.1.2	Délai	94
3.7.1.3	Débit sans fil	95
3.7.1.4	Ratio de livraison de paquets (PDR).....	95
3.7.2	Deuxième scénario	96
3.7.2.1	Charge du trafic	96
3.7.2.2	Délai	97
3.7.2.3	Débit sans fil	98
3.7.2.4	PDR Ratio de livraison de paquets (PDR)	98
	Protocoles	99
	Conclusions.....	99
3.8	Conclusion.....	100
4	Contribution 2 : Conception d'un protocole de routage basé sur AODV et sur la hiérarchisation du réseau pour la minimisation de l'énergie consommée dans les RCSF.....	102
4.1	Introduction	102
4.2	Motivation pour la conception de protocoles de routage efficaces en énergie.....	102
4.3	Le modèle d'énergie utilisé.....	104
4.4	Le schéma de routage proposé.....	105
4.4.1	La phase d'initialisation.....	105
4.4.2	La phase de communication.....	106
4.4.3	Phase de maintenance de route.....	108
4.4.4	La prise en compte de la qualité de service dans le protocole proposé.....	108
4.4.5	Environnement de simulation	109
4.4.5.1	Traçage de paquets à base de texte	110
4.4.5.2	Network Animator (NAM)	111
4.4.5.3	Les principaux paramètres utilisés dans la simulation des réseaux sans fil	111
4.4.6	Simulation	112
4.5	Hypothèses de simulation	112
4.6	Résultats de simulation	112
4.6.1	L'énergie dissipée dans le réseau	113
4.6.2	Délai de bout en bout	115
4.6.3	Ratio de livraison des paquets.....	116

4.7	Conclusion.....	116
5	Contribution 3 : Conception d'un protocole de routage basé sur le clustering pour la minimisation de l'énergie consommée dans les RCSF (EEHCBRP)	119
5.1	Introduction	119
5.2	Étude détaillée des protocoles de routage efficaces en énergie	120
5.2.1	LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical)	120
5.2.2	PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)	123
5.2.3	HEED (Hybrid Energy Efficient Distributed Clustering	124
5.3	Le protocole de routage proposé	125
5.3.1	Objectif et caractéristiques du protocole proposé.....	125
5.3.2	Description du protocole proposé	126
5.3.2.1	Phase d'initialisation	127
5.3.2.2	Phase de clustering	127
5.3.2.3	Schéma TDMA et gestion des routes	128
5.3.2.4	Réélection de CH et la métrique utilisée.....	129
5.3.2.5	Modèle d'agrégation de données.....	129
5.3.2.6	Paquets échangés dans le protocole EEHCBRP	130
5.3.2.7	Le modèle d'énergie utilisé	130
5.4	Simulations et résultats	131
5.4.1	Paramètres de simulation	131
5.4.2	Analyse des résultats de simulation	131
5.4.2.1	Energie totale consommée.....	132
5.4.2.2	Débit.....	133
5.4.2.3	Ratio de livraison de paquets	134
5.5	Conclusion.....	135
	Conclusion générale.....	137
	Perspectives	137
	REFERENCES	138
	ANNEXES	147

Liste des figures

Figure 1: Les catégories des réseaux sans fil.....	17
Figure 2: Consommation d'énergie dans un noeud capteur.....	18
Figure 3: Le modèle OSI et son interaction avec les protocoles MANET 802.11	24
Figure 4: Transmission d'un paquet de données en mode Ad hoc	26
Figure 5: Portée de transmission dans un réseau Ad hoc.....	29
Figure 6: Mécanisme de détection des liens et des voisins dans le routage proactif	31
Figure 7: Classification des applications des RCSF	35
Figure 8: Architecture d'un RCSF.....	39
Figure 9: Composition d'un nœud capteur.....	39
Figure 10: Pile protocolaire des RCSF	41
Figure 11: Processus de déploiement et de routage dans les RCSF.....	44
Figure 12: Classification des protocoles de routage des RCSF.....	46
Figure 13: Techniques d'efficacité énergétique dans les RCSF	63
Figure 14: Classification des mécanismes d'efficacité énergétique dans les RCSF.....	65
Figure 15: Exemple de codage réseau	66
Figure 16: Méthodologie de recherche	78
Figure 17: Architecture of Mobile Ad hoc Networks (MANET).....	79
Figure 18: Classification des protocoles de routage MANET	80
Figure 19: Notre classification des protocoles de routage standardisés des MANET	81
Figure 20: Illustration du processus de routage dans DSR.....	82
Figure 21: Le format des paquets dans le protocole OLSR.....	83
Figure 22: Illustration des processus d'établissement et de maintenance de routes dans AODV	86
Figure 23: Organigramme du simulateur OPNET	90
Figure 24: Environnement de simulation du scenario 1 dans OPNET.	92
Figure 25: Évaluation de la charge de trafic dans le scénario 1	93
Figure 26: Évaluation du délai de communications sans fil dans le scénario 1.....	94
Figure 27: Évaluation du débit de communications dans le scénario 1	95
Figure 28: Évaluation du ratio de livraison de paquets dans le scénario 1.....	95
Figure 29: Évaluation de la charge de trafic dans le scénario 2	96
Figure 30: Évaluation du délai de communications sans fil dans le scénario 2.....	97
Figure 31: Évaluation du débit de communications dans le scénario 2	98
Figure 32: Évaluation du ratio de livraison de paquets dans le scénario 2.....	98
Figure 34: Module de consommation d'énergie dans les RCSF	104
Figure 35: Le schéma d'hiérarchisation en couches dans l'approche de routage proposée	106
Figure 36: Organigramme de la phase de communication	107
Figure 37: Modèle de qualité de service pour les RCSF.....	108
Figure 38: Architecture du simulateur NS-2.....	109
Figure 39: Évaluation de l'énergie dissipée dans le réseau.....	114
Figure 40: Évaluation du délai moyen de bout en bout.....	115

Figure 41: Évaluation du ratio de livraisons de paquets	116
Figure 42: Schéma de base du protocole LEACH.....	120
Figure 43: organigramme de la phase de mise en service dans le protocole LEACH	122
Figure 44: Construction de chaine dans PEGASIS.....	123
Figure 45: Organigramme de la phase de mise en place dans notre protocole de routage (EEHCBRP) ..	126
Figure 46: Processus d'agrégation des données dans chaque cluster dans le protocole EEHCBRP.....	130
Figure 47: Évaluation de l'énergie totale consommée dans notre protocole Vs LEACH, PEGASIS et HEED.....	132
Figure 48: Évaluation du débit dans notre protocole Vs LEACH, PEGASIS et HEED.....	133
Figure 49: Évaluation du ratio de livraison de paquets dans notre protocole Vs LEACH, PEGASIS et HEED.....	134

Liste des tables

Table 1: Table de routage dans le protocole OLSR.....	84
Table 2: Table de routage dans le protocole DSDV	87
Table 3: Caractéristiques du protocole ZRP.....	89
Table 4: Paramètres de simulation sous OPNET.....	92
Table 5: Tableau comparatif des protocoles de routage étudiés selon les résultats de nos simulations	100
Table 6: Paramètres de simulation dans NS-2.35.....	113
Table 7: Paramètres de simulation dans Matlab	131

Liste des abréviations

ACK	Acknowledgement
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector
AoA	Angle of Arrival
CH	Cluster Head
CA	Certificate Authority
DAG	Directed Acyclic Graph
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing
FTP	File Transfer Protocol
GRP	Geographic Routing Protocol
GPS	Glob Positioning System
HEED	Hybrid Energy Efficient Distributed
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IoT	Internet of Things
Kbps	Kilobits Per Second
LCH	Layered Clustering Hierarchy
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile Ad hoc Network
Mbps	Megabits Per Second
MHz	Megahertz
MPR	Multipoint Relay (Relai multipoint)
NS	Network Simulator
OLSR	Optimized Link State Routing
OPNET	Optimized Network Evaluation Tool
OSI	Open Systems Interconnection
PEGASIS	Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems
QoS	Quality of Service

RREP	Route Reply
RREQ	Route Request
RSSI	Received Signal strength Indicator
Rx	Receiver
TC	Topology Control
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TDoA	Time Differenc of Arival
ToA	Time of Arrival
TORA	Temporally Ordered Routing Algorithm
Tx	Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
WLAN	Wireless Local Area Network
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
ZRP	Zone Routing Protocol

Liste des notations

D	Distance en mètre
E_{CH}	Energie d'un CH
$E_{Cluster}$	Energie dissipée dans un cluster
E_{totale}	Energie dissipée par tous les nœuds du réseau
$E_{Rx}(k)$	Energie de réception de k bits
$E_{Tx}(k, d)$	Energie de transmission de k bits à une distance de d mètres
E_{elec}	Energie consommée par l'amplificateur pour envoyer ou recevoir un bit
N	Nombre de nœuds

Introduction générale

Alimentés par les développements de la technologie numérique et des radiofréquences (RF), les appareils mobiles portables, tels que les téléphones cellulaires, les assistants numériques personnels (PDA) et les ordinateurs portables, ont entraîné une forte demande de communication sans fil. Cette dernière est devenue un terme générique et global utilisé pour désigner les communications dans lesquelles les ondes électromagnétiques transmettent un signal sur une partie ou la totalité d'une partie de l'antenne. Les systèmes sans fil sont regroupés en plusieurs catégories selon le type de communication et de réseau :

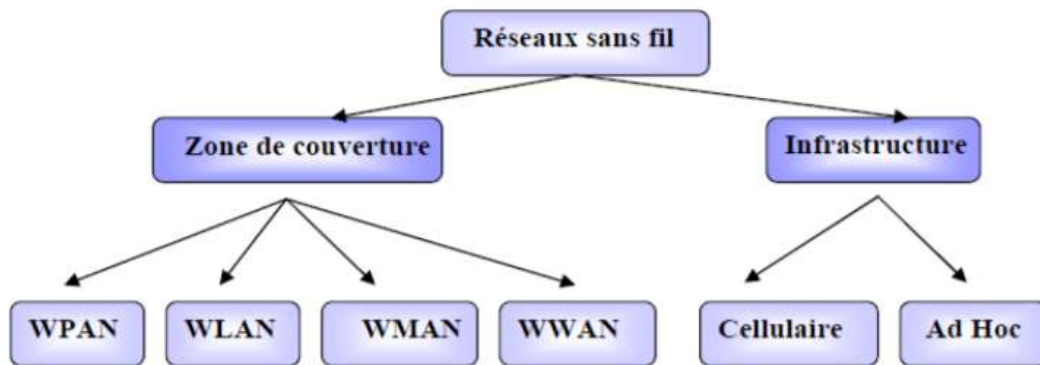


Figure 1: Les catégories des réseaux sans fil[1]

Divers réseaux de communication sans fil ont été développés, tels que les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fil (WLAN)[1], les réseaux Bluetooth[1], les réseaux ultra-large bande (UWB)[1], les réseaux mobiles Ad hoc (MANET)[1] et WiMax[1]. D'une part, les réseaux cellulaires et les WLAN[1] sont des réseaux centralisés, ce qui nécessite une infrastructure coûteuse et une administration centralisée. D'autre part, grâce à la technologie Bluetooth, les hôtes peuvent se connecter entre eux de manière Ad hoc et communiquer sans infrastructure fixe se différenciant ainsi des autres technologies sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)[2] font partie de la catégorie des réseaux ad-hoc. Ils se composent d'un grand nombre de nœuds capteurs distribués organisés en un réseau sans fil à sauts multiples et capables de convertir une caractéristique détectée telle que la température, les vibrations, la pression,... en une caractéristique formelle reconnue par les utilisateurs[3]. Dans le réseau de capteurs sans fil, l'un des principaux problèmes est lié à la problématique de l'énergie car chaque nœud est alimenté par une batterie difficile à charger ou à remplacer ce qui limite les ressources énergétiques associées à chaque capteur et impacte la durée de vie du réseau en entier. C'est pourquoi certaines techniques sont appliquées pour que l'énergie associée à chaque nœud puisse être conservée notamment à la phase de routage prolongeant ainsi la durée de vie du réseau.

La conception de réseaux de capteurs sans fil efficaces sur le plan énergétique représente toutefois un défi de taille : d'une part, les capteurs à contrainte énergétique sont limités en termes de mémoire et de capacité de calcul, ce qui empêche l'utilisation d'algorithmes complexes et rend les protocoles traditionnels de la pile TCP/IP mal adaptés. D'autre part, contrairement à d'autres réseaux, les

RCSF[2] sont conçus pour des applications spécifiques qui vont des petits systèmes de supervision des soins de santé à la surveillance de l'environnement à grande échelle.

Problématique et contributions de cette thèse

La nouvelle vague de recherche sur les réseaux de capteurs met l'accent sur la technologie des réseaux et le traitement de l'information qui conviennent aux environnements Ad hoc hautement dynamiques et aux nœuds capteurs aux ressources limitées. De plus, les nœuds capteurs sont beaucoup plus petits en taille et beaucoup moins chers en prix, et donc de nombreuses nouvelles applications civiles des réseaux de capteurs telles que la surveillance de l'environnement, les capteurs pour véhicules et les réseaux de capteurs corporels ont vu le jour.

Cependant, l'utilisation des réseaux de capteurs dans les applications rencontre quelques problèmes: le capteur lui-même souffre de nombreuses limitations telles que des sources d'énergie insuffisantes, une petite mémoire et une capacité de traitement limitée. De plus, en raison du déploiement de capteurs en grand nombre, les applications des RCSF traitent d'autres problèmes tels que le routage multi-sauts, la sécurité, la fiabilité des données et la scalabilité.

L'efficacité énergétique, par conséquent, devient l'un des problèmes les plus difficiles à résoudre dans les RCSF et est considérée comme un facteur clé pour prolonger la durée de vie du réseau[4].

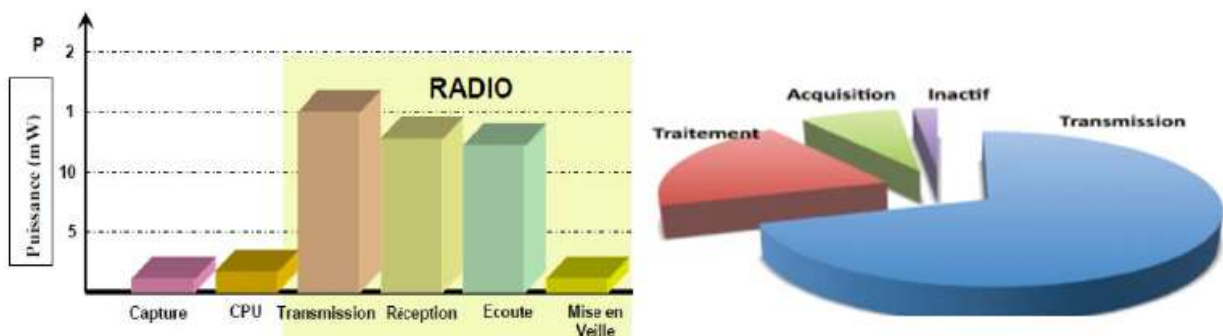


Figure 2: Consommation d'énergie dans un nœud capteur[5]

En termes d'efficacité énergétique, une faible consommation d'énergie est la clé de la longévité des appareils indépendants alimentés par batterie et de la réduction des coûts de maintenance. C'est également une autre exigence pour les applications des RCSF et de l'IoT[2], en particulier pour les appareils à batteries difficiles à remplacer. Dans les RCSF, les nœuds capteurs collectent les données et les transmettent au réseau pour une utilisation ultérieure. Cette transmission et réception de données utilise la majeure partie de l'énergie du réseau. Ainsi, pour améliorer le fonctionnement et augmenter la durée de vie du réseau, la consommation d'énergie doit être le principal facteur de préoccupation.

Comme le montre la (**Figure 2**), l'étude de la consommation d'énergie dans les RCSF est indissociable du mode de communication entre les capteurs et de l'utilisation du module radio d'un nœud. Le routage de données est l'une des opérations fondamentales dans les RCSF, c'est pourquoi de nombreux algorithmes et techniques ont été proposés et conçus à partir de différentes

perspectives pour utiliser plus efficacement la ressource énergétique limitée, afin d'améliorer leur durée de vie et leur fonctionnement autant que possible.

La principale contribution de cette thèse est de fournir un cadre de modélisation, d'analyse et de conception de protocoles de routage efficaces en énergie pour les RCSF. Nous nous concentrerons sur la problématique fondamentale de l'énergie consommée dans l'environnement des RCSF reconnu d'être contraints en termes de ressources et notamment aux problèmes du routage. On fournit également une bonne compréhension des défis et des solutions de routage de données du réseau mobile Ad hoc et des RCSF.

Plus spécifiquement, cette thèse tente de répondre aux questions suivantes :

- ✓ Quels sont les problèmes de routage liés aux réseaux Ad hoc à sauts multiples ?
- ✓ Quelles techniques d'efficacité énergétiques sont requises dans la phase de routage de données pour prolonger la durée de vie du RCSF ?

Les objectifs de la thèse sont les suivants :

- 1) L'implémentation d'un réseau MANET en utilisant différents protocoles de routage et comparant les résultats par rapport à plusieurs métriques afin de développer une meilleure compréhension des protocoles de routage selon différentes situations du réseau, ce qui nous permettra par la suite de concevoir des nouveaux modèles de protocoles de routage efficaces en énergie pour les RCSF.
- 2) La conception d'un protocole de routage à sauts multiples pour améliorer la fiabilité et l'efficacité énergétique.
- 3) La proposition d'une technique de routage basée sur le clustering et à sauts multiples pour améliorer l'efficacité énergétique et la scalabilité.

Nous diviserons notre travail en deux modèles : le modèle théorique et le modèle de simulation. Dans le modèle théorique, nous étudierons différentes problématiques de routage et leurs solutions et dans le modèle de simulation, nous exécuterons des simulations avec la configuration du réseau et essayerons d'apprendre les mécanismes qui nous aideront à améliorer le routage et à assurer l'efficacité énergétique dans les RCSF.

Propriétés et hypothèses

Dans cette thèse, on considère les hypothèses suivantes :

- Les réseaux de capteurs sans fil se composent d'un certain nombre de nœuds capteurs répartis ou placés selon les exigences de l'application afin de surveiller les événements qui se produisent dans le champ de déploiement.
- La station de base (puits), qui collecte les données des nœuds, interagit avec un utilisateur qui surveille l'activité. Les données peuvent être recueillies de plusieurs façons, par exemple : en utilisant des techniques de sauts ou en transmettant des données à certaines fréquences. Les nœuds puits ont des caractéristiques plus avancées que les nœuds capteurs

en termes de capacités de transmission et de traitement des données, de la taille de la mémoire et des réserves d'énergie. Il peut y avoir plusieurs puits pour un réseau de sorte qu'il n'y ait pas de point de défaillance unique.

- La dissipation de l'énergie est un facteur majeur dans les RCSF lors de la communication entre les nœuds, d'où la nécessité d'économiser l'énergie afin que les piles ne s'épuise pas rapidement, car elles ne sont pas facilement remplaçables dans des applications telles que la surveillance.
- La qualité du service assure une communication efficace dans les délais prescrits ou limités. Les protocoles doivent vérifier la stabilité du réseau et la pertinence des données (éviter les redondances), et maintenir certains facteurs limitant les ressources, tels que la bande passante, la taille de la mémoire tampon et les capacités de traitement.
- Le mode de transmission joue un rôle important dans les RCSF, les nœuds capteurs peuvent utiliser des communications à saut unique ou à sauts multiples selon la topologie de réseau choisie pour communication et la transmission des données dans le réseau.
- Les nœuds capteurs peuvent être mobiles ou statiques selon l'application.
- Dans les applications de surveillance, les nœuds de capteurs sont placés dans des zones non accessibles d'où le besoin d'assurer leur auto-organisation dans le réseau.

Organisation du manuscrit

Le travail entrepris dans cette Thèse comporte six chapitres :

- ✓ Chapitre 1 : Environnement sans fil et réseau Ad hoc

Ce chapitre présente une description de l'environnement sans fil, nous décrivons les réseaux Ad hoc, leurs caractéristiques et les différentes classes des protocoles de routage. Nous présentons également quelques généralités sur les réseaux de capteurs sans fil, les principales catégories d'applications et leurs exigences ainsi que les normes existantes pour ces réseaux.

- ✓ Chapitre 2 : Etat de l'art sur les techniques d'efficacité énergétique dans les RCSF

Dans ce chapitre nous donnons un aperçu complet des principaux mécanismes d'efficacité énergétique existants conçus pour les réseaux de capteurs sans fil et discutons de leurs avantages et de leurs contraintes par rapport à l'ensemble des exigences que nous avons identifiées

- ✓ Chapitre 3 : Contribution 1

Dans cette contribution, nous nous concentrons sur la problématique du routage des données qui représente le défi majeur dans le déploiement des réseaux Ad hoc. L'objectif principal est de réaliser une étude empirique des différents protocoles de routage Ad hoc de toutes les classes basée sur la simulation et l'analyse à travers différents scénarios de réseau que nous avons mis en œuvre à l'aide du simulateur OPNET.

- ✓ Chapitre 4 : Contribution 2

La deuxième contribution tire profit de la première contribution pour proposer un protocole de routage amélioré et efficace en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil à sauts multiples. Le protocole proposé est discuté de manière détaillée, comprenant le modèle de système, les schémas proposés, leurs résultats de simulation et leur analyse.

✓ Chapitre 5 : Contribution 3

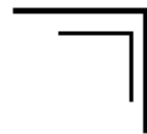
La troisième contribution a pour objectif à concevoir une approche de routage exploitant les techniques d'économie d'énergie dans les RCSF et visant à équilibrer la charge entre les nœuds capteurs à l'aide de la technique de clustering et à prolonger la durée de vie globale du réseau. Les résultats de simulation montrent que l'approche proposée améliore significativement l'efficacité énergétique du réseau par rapport aux solutions existantes.

✓ Chapitre 6 : Conclusions et perspectives

Les conclusions et les perspectives des recherches futures sont projetées à la fin du manuscrit.

Chapitre I : Environnement sans fil, introduction aux réseaux Ad hoc et aux Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)

*Ce premier chapitre présente les réseaux sans fil
et met en évidence les réseaux Ad hoc
et les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)*



1 Chapitre 1 : Introduction aux réseaux Ad hoc et aux réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

La technologie sans fil a vu le jour dans les années 1970 et depuis cette date elle ne cesse de se développer[6]. Grâce à L'utilisation illimitée d'internet à l'heure actuelle, la technologie sans fil a atteint de nouveaux sommets [7]. Aujourd'hui, on distingue deux types de réseaux sans-fil: Le premier qui est un réseau sans fil construit sur la base d'un réseau câblé et qui crée ainsi un réseau fiable avec infrastructure. Les nœuds sans fil également connectés au réseau câblé et aux stations de base comme l'exemple des réseaux de téléphones cellulaires où un téléphone se connecte à la station de base avec les meilleurs qualités du signal. Le deuxième type de technologie sans fil est celui où il n'existe aucune infrastructure, sauf les nœuds mobiles le formant. C'est ce qu'on appelle un réseau sans fil sans infrastructure ou un réseau Ad hoc. Ce mot signifie quelque chose qui est non fixe ou non organisée, c'est-à-dire dynamique. Des progrès récents tels que le développement du Bluetooth ont permis d'introduire un nouveau type de technologie sans fil fréquemment connu sous le nom de réseaux mobiles Ad hoc[8].

Les réseaux de communication sans fil présentent un certain nombre d'avantages par rapport à leurs homologues câblés traditionnels[7]. En principe, les réseaux sans fil permettent une connectivité n'importe où et n'importe quand. Ils peuvent être déployés dans des zones sans infrastructure de communication filaire préexistante ou là où il est difficile de poser des câbles tout en assurant un coût d'installation moins couteux et une configuration de communication flexible et instantanée.

La norme IEEE 802.11 [9] définit deux modes opératoires des réseaux locaux sans fil (WLAN)[1] en fonction des configurations sous-jacentes : les réseaux basés sur l'infrastructure et les réseaux sans infrastructure (ou Ad hoc). Les WLAN basés sur l'infrastructure nécessitent des nœuds spéciaux (c'est-à-dire des hôtes ou des terminaux dans le réseau) appelés points d'accès (PA), qui sont connectés via des câblés existants. Les (PA) sont utilisés pour coordonner la communication entre les nœuds mobiles (les hôtes mobiles ou les terminaux du réseau tels que les ordinateurs portables et les PDA) et les réseaux câblés. L'ensemble des nœuds mobiles associés à un point d'accès particulier est appelé ensemble de services de base (BSS) [10].

Les réseaux locaux sans fil Ad hoc n'ont pas besoin d'infrastructure fixe et n'ont besoin que des nœuds mobiles pour coopérer entre eux afin de former un service de base indépendant (IBSS) et d'échanger des données. Toutefois, cette configuration de la norme IEEE 802.11 [9] est limitée à la communication à saut unique, qui ne s'applique qu'aux nœuds mobiles situés dans un rayon de transmission mutuel. Mais, à mesure que la puissance de traitement et les capacités d'émetteur-récepteur des nœuds mobiles ont augmenté, il est devenu possible d'augmenter la portée de communication de l'IBSS en utilisant les nœuds mobiles eux-mêmes comme agents de transmission et en s'appuyant sur les couches supérieures de la pile du protocole pour des chemins multi-sauts. Cela nécessite la mise en œuvre de mécanismes de routage à chaque nœud mobile afin qu'il puisse acheminer les paquets vers les destinations prévues.

En agissant comme routeurs, les nœuds mobiles peuvent former la base d'un réseau spontané qui étend la portée du WLAN Ad hoc au-delà du rayon de transmission de la source. Cette dernière configuration des réseaux locaux sans fil Ad hoc est communément appelée réseau mobile sans fil Ad hoc (ou MANET en abrégé).

1.2 Les réseaux mobiles Ad hoc (MANET)

1.2.1 Le modèle de référence OSI et modèle TCP/IP

L'Organisation internationale de normalisation (ISO) a proposé le modèle de référence de l'interconnexion des systèmes ouverts (OSI) au début des années 1980, qui était principalement conçu pour permettre aux ordinateurs de plusieurs fournisseurs d'interagir et de communiquer. L'architecture OSI en couches présente un cadre général pour la construction de systèmes modulaires. Ce modèle divise les fonctionnalités du réseau, qui interviennent dans la transmission des données de bout en bout, en couches hiérarchiques contenant des sous-tâches (sous-fonctions).

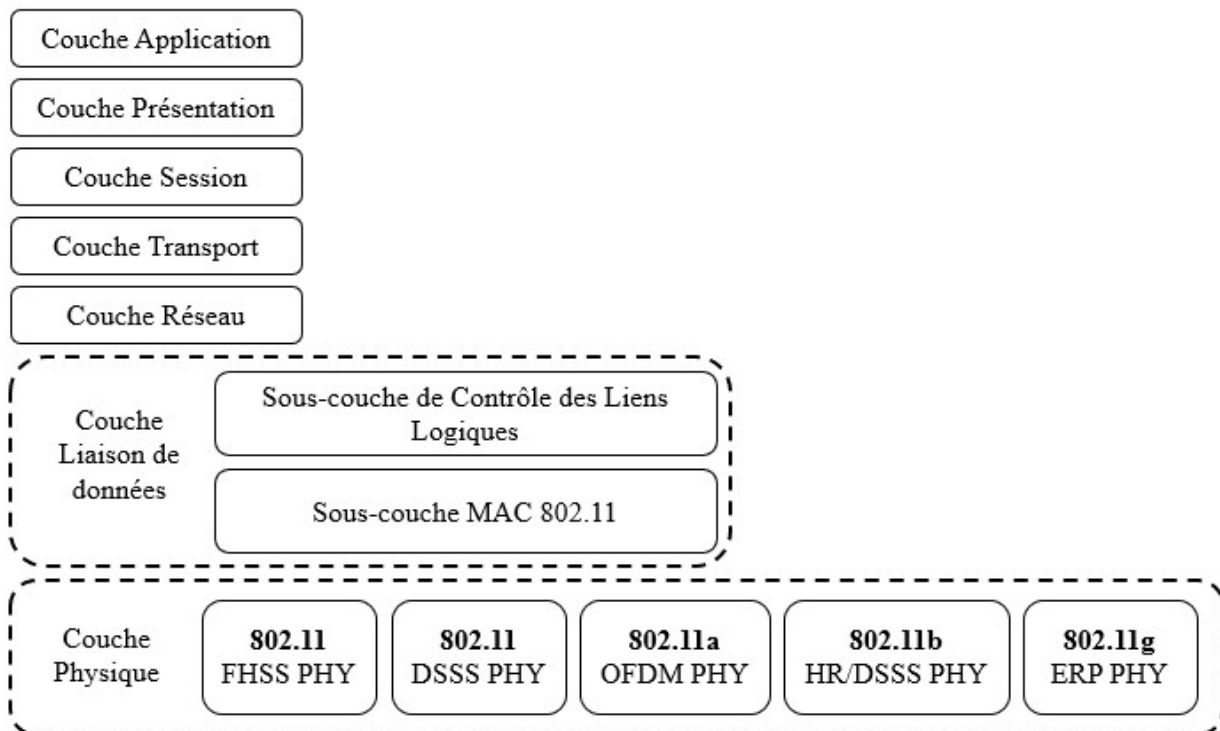


Figure 3: Le modèle OSI et son interaction avec les protocoles MANET 802.11[11]

Le modèle de référence OSI comprend sept couches où chacune possède une fonction bien définie. Les limites des couches sont choisies en fonction de la minimisation de l'information nécessaire entre les couches. Les sept couches sont définies comme suit :

- La **couche Physique** transmet les bits sur un canal de communication.
- La **couche Liaison de données** décompose les données d'entrée en trames de données et les transmet à la couche réseau sur une ligne apparaissant sans erreur de transmission non détectée.

- La **couche Réseau** détermine comment les paquets sont acheminés de la source à la destination. Pour prendre en charge la qualité de service, le protocole de routage doit disposer d'un schéma intégré, les informations sur l'état actuel du réseau sont fournies à l'application pour l'optimisation des performances.

- La **couche Transport** reçoit les données de la couche session, les décompose en petits morceaux si nécessaire, et utilise un moyen efficace pour s'assurer que les fragments de données peuvent être recueillis correctement à la destination. UDP et TCP sont deux protocoles de la couche transport largement utilisés dans les réseaux câblés. UDP ne dispose d'aucun système de contrôle de la congestion pour réagir à la congestion du réseau. Les applications qui utilisent UDP comme protocole de transport sous-jacent pour transmettre des paquets peuvent facilement submerger le réseau de données, ce qui entraîne un gaspillage considérable d'énergie et de bande passante dans la transmission de paquets qui seront abandonnés en raison de la congestion. Par conséquent, certains pré-dépôts de paquets UDP devraient être étudiés pour réagir à la congestion. TCP a un schéma inhérent de contrôle de congestion, donc le contrôle de congestion n'est pas un problème. Cependant, les performances de TCP doivent être optimisées pour ajuster la fenêtre TCP, ce qui nécessite des informations en retour des couches inférieures du réseau. Par conséquent, certaines informations de la file d'attente des paquets et de la couche de routage doivent être envoyées à la couche de transport pour optimiser les performances.

- La **couche Session** permet d'établir des sessions entre différentes machines.

- La **couche Présentation** fournit une solution standard aux utilisateurs et s'occupe de la syntaxe et de la sémantique des informations transmises.

- La **couche Application** inclut des protocoles tels que FTP, HTTP, Real-time Audio, etc. Les applications peuvent être classées en applications en temps réel et en temps non réel en fonction de leur sensibilité au délai de transmission des paquets. Les applications en temps réel ont des exigences strictes en ce qui concerne le délai de transmission des paquets. Par conséquent, la retransmission de paquets n'est pas autorisée. Les applications qui entrent dans cette catégorie sont les vidéos en direct et les vidéoconférences en ligne. D'autre part, pour les applications qui ne sont pas en temps réel, le délai de transmission des paquets n'est pas un gros problème, et la livraison des paquets est garantie par des confirmations explicites dans la couche transport. Le réseau devrait être conçu pour répondre aux différentes exigences en matière de délai de transmission des paquets de ces deux types d'applications.

1.2.2 Définition des réseaux mobiles Ad hoc

Le réseau mobile Ad hoc est constitué d'un ensemble de nœuds mobiles sans fil configurés dynamiquement où l'interface radio sans fil connecte chaque dispositif indépendamment et de façon aléatoire rendant possible la communication entre les nœuds sans l'aide d'une infrastructure réseau existante et où chaque nœud agit comme un commutateur intermédiaire (fonctionne comme une source et un puits, et relaie également des paquets pour d'autres hôtes)[1][8]. Les nœuds mobiles peuvent communiquer directement avec les nœuds qui se trouvent à portée radio l'un de l'autre, tandis que les autres nœuds ont besoin de l'aide des nœuds intermédiaires pour acheminer leurs paquets.

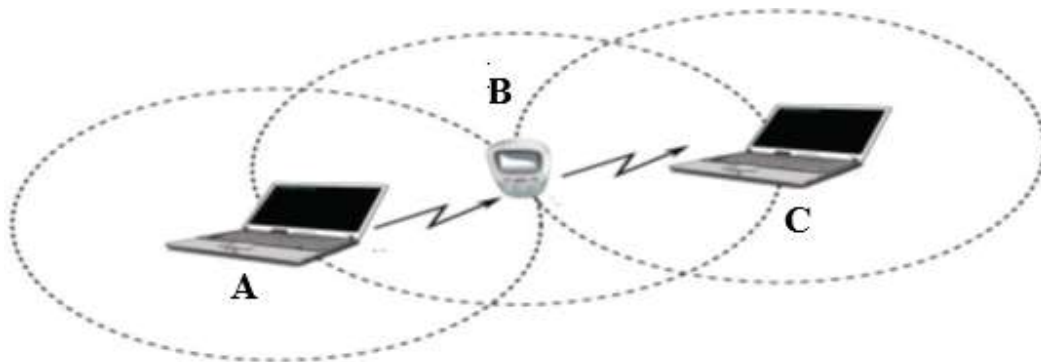


Figure 4: Transmission d'un paquet de données en mode Ad hoc[12]

La (**Figure 4**) montre un exemple de transmission d'un message dans un réseau Ad hoc entre deux équipements distants A et C. Comme ces deux derniers ne peuvent pas communiquer directement à cause de la portée limitée du support de transmission utilisé, alors ils utilisent l'équipement B comme relai.

La gestion et la mise en place des MANET posent de nombreux défis : le réseau est décentralisé et toutes les activités du réseau, y compris la découverte de la topologie et la transmission des messages, doivent être exécutées par les nœuds eux-mêmes. Par conséquent, la fonctionnalité de routage devra être incorporée dans les nœuds du réseau.

1.2.3 Caractéristiques des MANET

Les MANET ont des caractéristiques similaires à celles des autres réseaux de communication sans fil, qui sont principalement attribuées aux propriétés du canal sans fil. Ce dernier étant sujet aux erreurs, ce qui rend la largeur de bande de la liaison et le délai des paquets imprévisibles en raison des défaillances multi-chemins, des interférences et de l'ombrage des voies multiples. En plus de cette caractéristique commune, les MANET ont leurs propres caractéristiques[13] :

Fonctionnement distribué : il n'y a pas de réseau en arrière-plan pour le contrôle central des opérations du réseau. Le contrôle du réseau est réparti entre les nœuds qui doivent coopérer et communiquer entre eux pour mettre à assurer des fonctions spécifiques telles que le routage et la sécurité.

Terminal autonome : dans les MANET, chaque nœud mobile est un nœud indépendant qui peut fonctionner à la fois comme hôte et comme routeur.

Médium partagé : aucune allocation centralisée des ressources n'existe, le support de communication sans fil est accessible à toute entité disposant de l'équipement approprié et des ressources adéquates. Par conséquent, l'accès au canal est fondé sur la concurrence et ne peut être restreint.

Topologie dynamique : les nœuds sont libres de se déplacer arbitrairement à des vitesses différentes. Ainsi, la topologie du réseau peut changer de façon aléatoire et à tout moment et les liens sont créés et détruits d'une manière imprévisible (un lien stable ne peut être garanti). Les

nœuds du réseau MANET établissent dynamiquement le routage entre eux au fur et à mesure qu'ils se déplacent.

Routage à sauts multiples : lorsqu'un nœud tente d'envoyer des informations à d'autres nœuds qui se situent hors de sa portée de communication, le paquet doit être transféré via un ou plusieurs nœuds intermédiaires.

Caractéristiques physiques : les canaux sans fil sont intrinsèquement sujets aux erreurs en raison d'effets tels que le fading multi-chemin, les interférences causant une bande passante et un délai de livraison de paquets imprévisibles ce qui entraîne des communications peu fiables.

1.2.4 Contraintes des MANET

Malgré leurs caractéristiques énumérées, les MANET présentent également des contraintes que l'on cite ci-dessous [14]:

Largeur de bande : une largeur de bande de communication est disponible dans les réseaux câblés en raison de l'avènement des câbles à fibres optiques et de l'exploitation des technologies de multiplexage par répartition en longueur d'onde. Toutefois, la largeur de bande de radiofréquence disponible du canal sans fil dans les MANET est nettement inférieure à celle de leurs homologues câblés. Puisque le canal sans fil est partagé par les nœuds situés dans la même zone de transmission, la largeur de bande disponible par canal sans fil dépend du nombre de nœuds et du trafic qu'ils injectent chacun dans le réseau. Par conséquent, seule une fraction de la bande passante totale est disponible pour chaque nœud. De plus, la disponibilité limitée de la bande passante impose une contrainte sur les protocoles de routage lors de la maintenance des informations topologiques. En raison des changements fréquents dans la topologie du réseau, le maintien d'informations topologiques cohérentes à tous les nœuds entraîne un important surcoût de communication qui, à son tour, conduit à une utilisation inefficace de la bande passante limitée des canaux. Par conséquent, la conception de tout protocole de routage devrait tenir compte de cette contrainte en minimisant autant que possible les coûts généraux de routage.

Ressources limitées : la plupart des nœuds de réseau Ad hoc tels que les ordinateurs portables et les capteurs souffrent de ressources limitées par rapport à leurs homologues câblés. Ces ressources comprennent l'énergie, la puissance de calcul et la mémoire. Les composants informatiques utilisés dans un nœud mobile, tels que les processeurs, par conséquent, les algorithmes utilisés dans les protocoles de communication doivent être légers en termes d'exigences de calcul et de stockage.

Affaiblissement du signal sur le trajet : il s'exprime par le rapport de la puissance du signal transmis à celle du signal reçu au niveau du récepteur sur un chemin donné. L'estimation de l'affaiblissement sur le trajet est essentielle à la conception et au déploiement des réseaux 802.11, car elle mesure les effets du terrain et de la fréquence porteuse utilisée sur la propagation du signal. Plusieurs modèles d'affaiblissement sur le trajet ont été proposés pour les réseaux 802.11. Le modèle de propagation en espace libre est le modèle d'affaiblissement sur le trajet le plus simple qui suppose l'existence d'un signal de trajet direct entre l'émetteur et le récepteur, sans atténuation atmosphérique des composantes à trajets multiples. Un autre modèle populaire de propagation de signaux sans fil est le modèle à deux rayons qui suppose que le signal atteint le récepteur par deux

voies, une voie en visibilité directe et une autre voie par laquelle l'onde réfléchiée ou réfractée et dispersée est reçue.

Diminution de l'intensité : l'un des principaux problèmes qui affectent les réseaux de radiofréquences est l'évanouissement par trajets multiples. Il s'agit des fluctuations rapides de l'intensité du signal lorsqu'il est reçu par le récepteur et il est généralement causé par des mécanismes de propagation, notamment la réflexion, la réfraction ou la diffraction du signal transmis. Par exemple, la plupart des nœuds mobiles fonctionnant sur la norme 802.11 sont équipés d'antennes omnidirectionnelles qui émettent de l'énergie radiofréquence dans toutes les directions. Les signaux se propagent vers l'extérieur à partir de l'antenne d'émission et sont réfléchis, réfractés ou diffractés par des obstacles dans le rayon d'émission. Le signal reçu par le récepteur est la somme de toutes les différentes composantes. Le signal combiné au niveau du récepteur peut donner une superposition nette de 0 (c'est-à-dire si différentes composantes du signal sont arrivées à 180° déphasées), auquel cas la fonction ne serait pas en mesure de décoder le signal.

Interférence : la couche MAC de la norme 802.11 est soigneusement conçue pour réduire les interférences dans le même canal en coordonnant dynamiquement l'accès au canal sans fil entre nœuds mobiles. D'autres approches pour réduire le brouillage radioélectrique au niveau de la couche physique comprennent l'utilisation d'antennes directionnelles qui émettent des signaux radioélectriques dans des directions particulières.

Compte tenu des contraintes de transmission susmentionnées et pour les émetteurs-récepteurs isotropes, trois gammes de signaux peuvent être identifiées comme indiqué à la (**Figure 5**) Ceux-ci sont du point de vue de l'expéditeur :

Portée de transmission (R_t) : la portée dans laquelle un paquet transmis peut être reçu avec succès par le récepteur prévu. Dans cette plage, le SINR (Rapport signal/interférence-plus-bruit) est suffisamment grand pour que la trame soit décodée par le récepteur. Le R_t dépend principalement de la puissance d'émission, de la prospérité de propagation radio et de la sensibilité du matériel du récepteur.

Portée de détection de porteuse (R_c) : la plage dans laquelle les nœuds sont capables de détecter le signal transmis, même si la réception de trame correcte n'est pas toujours disponible. Cette plage est utilisée par le nœud d'émission pour distinguer les canaux occupés des canaux inactifs. Un nœud mobile signale l'état du canal comme étant occupé si son mécanisme d'évaluation de canal 802.11 détecte une énergie supérieure à un seuil déterminé par la sensibilité de l'antenne. Le R_c est généralement plus grand que la portée d'émission, généralement deux fois plus grand que la portée d'émission lorsque le niveau de puissance d'émission le plus élevé est appliqué, comme le montre la (**Figure 5**). Cependant, un R_c élevé réduit la réutilisation spatiale (c'est-à-dire qu'il permet la communication simultanée entre différentes paires source-destination qui sont raisonnablement éloignées l'une de l'autre en utilisant soit le même intervalle de temps, soit la même bande de fréquences) et affecte le débit global car tout émetteur potentiel, qui pressent un trafic est tenu de rester en mode silence.

Portée d'interférence (R_i) : la portée à l'intérieur de laquelle le récepteur prévu peut être soumis à des interférences provenant d'autres sources de transmission, ce qui entraîne un taux d'erreurs de

transmission plus élevé que souhaité. Cette portée n'est pas fixe et dépend largement de la distance entre l'émetteur et le récepteur et de la distance entre les nœuds brouilleurs du récepteur.

On suppose généralement que la portée de transmission est inférieure à la portée de détection de la porteuse et à la portée de brouillage, c'est-à-dire $R_t < R_c$ et $R_t < R_i$

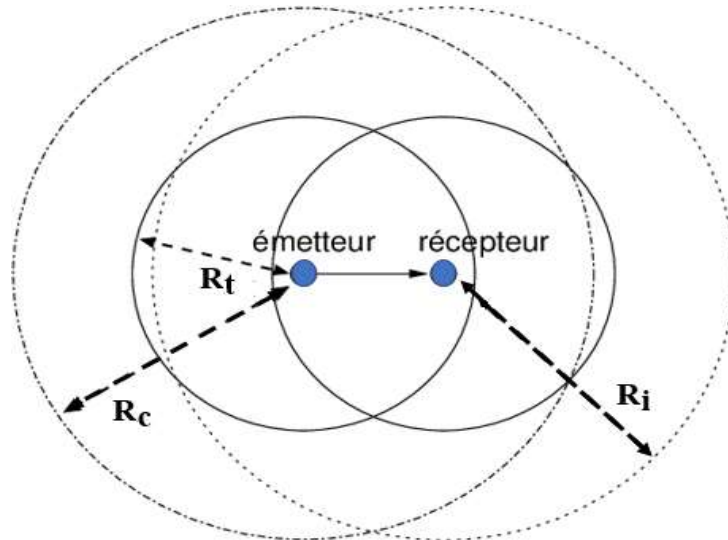


Figure 5: Portée de transmission dans un réseau Ad hoc[15]

Tout protocole de communication pour les MANET devrait tenir compte de la question de l'interférence dans le support partagé sans fil. Lorsque deux nœuds ou plus transmettent un paquet à un voisin commun en même temps, le nœud commun ne recevra aucun de ces paquets. Dans un tel cas, la collision se serait produite au niveau du nœud commun.

1.2.5 Le routage de données dans les MANET

Le routage est l'acte d'acheminer l'information d'une source à une destination dans un réseau. Ce concept n'est pas nouveau en informatique puisqu'il a été utilisé dans les réseaux au début des années 1970, mais n'a acquis plus de popularité qu'à partir du milieu des années 1980. La raison principale en est que les réseaux antérieurs étaient des environnements très simples et homogènes; mais, aujourd'hui, l'interconnexion haut de gamme et à grande échelle s'est réputée avec les dernières avancées dans les réseaux et la technologie des télécommunications. Le concept de routage implique essentiellement deux activités : premièrement, la détermination des chemins de routage optimaux et, deuxièmement, le transfert des paquets de données.

Dans les MANET, l'une des questions ouvertes et essentielles est de savoir comment acheminer les messages en tenant compte des caractéristiques et des contraintes de ces réseaux. En effet, l'étude des protocoles de routage est un domaine de recherche en pleine expansion qui vise à garantir un fonctionnement robuste et efficace à travers la recherche de routes multi-sauts pour l'acheminement des paquets de données de la source à la destination en raison de la portée de transmission limitée, de ce fait, les protocoles de routage classiques existants ne peuvent être utilisés sans modifications.

Un protocole de routage Ad hoc est une convention, ou norme, qui contrôle la façon dont les nœuds décident de router les paquets entre les nœuds dans le réseau[16]. Au cours des dernières années, de nombreux protocoles de routage pour les réseaux mobiles Ad hoc ont été proposés et améliorés afin de router efficacement les paquets de données entre deux nœuds d'un même réseau[17][18][19].

La conception de protocoles de routage efficaces est l'un des défis les plus importants des MANET et est essentielle au fonctionnement de base du réseau[20]. Dans les MANET, une route consiste en un ensemble ordonné de nœuds intermédiaires qui transportent un paquet sur un réseau de la source à la destination en le transférant d'un nœud à l'autre. Les caractéristiques uniques des MANET, font du routage dans les MANET une tâche difficile. Tout d'abord, la mobilité des nœuds se traduit par un réseau très dynamique avec des changements topologiques rapides entraînant de fréquentes défaillances d'itinéraires. Deuxièmement, le canal sans fil sous-jacent, qui fonctionne comme un support partagé, fournit une largeur de bande beaucoup plus faible et variable aux nœuds communicants que dans les réseaux câblés. Par conséquent, un protocole de routage efficace pour un environnement MANET doit s'adapter dynamiquement à l'évolution de la topologie du réseau et doit être conçu pour être efficace sur le plan de la bande passante en réduisant la surcharge de contrôle du routage de manière à ce que la plus grande partie possible de la bande passante du canal soit disponible pour la communication de données réelle[21].

D'importantes recherches ont été consacrées au développement de protocoles de routage pour les MANET. Ces protocoles peuvent être classés en trois grandes catégories selon les mécanismes de mise à jour des informations de découverte et de routage utilisés : proactifs (ou pilotés par table), réactifs (ou à la demande) et hybrides.

1.2.5.1 Les protocoles proactifs

Appelés aussi protocoles de routage pilotés par table[22]. Dans le routage proactif, chaque nœud doit maintenir une ou plusieurs tables pour stocker les informations de routage et tout changement dans la topologie du réseau doit être reflété en propageant les mises à jour à travers le réseau afin de maintenir une vue réseau cohérente.

Les protocoles proactifs sont appropriés pour les réseaux avec un nombre réduit de nœuds, car ces derniers doivent mettre à jour les entrées pour chaque nœud dans la table de routage ce qui induit à une réaction lente aux restructurations et aux dysfonctionnements, cependant, en raison du mécanisme de contrôle continu du trafic, il y a beaucoup de surcharge sur le réseau, ce qui est l'un des inconvénients des protocoles de routage pro-actifs.

Il y a trois étapes dans l'algorithme de routage proactif qui sont données ci-dessous :

Détection des liens et des nœuds voisins : Dans le mécanisme de détection de liens et de nœuds voisins nous savons par définition que les voisins et les liens développent des relations entre eux par l'envoi de paquets HELLO les uns aux autres afin qu'il y ait connectivité entre les différents dispositifs. Dans la (**Figure 6**), des scénarios de base entre les voisins ont été donnés.

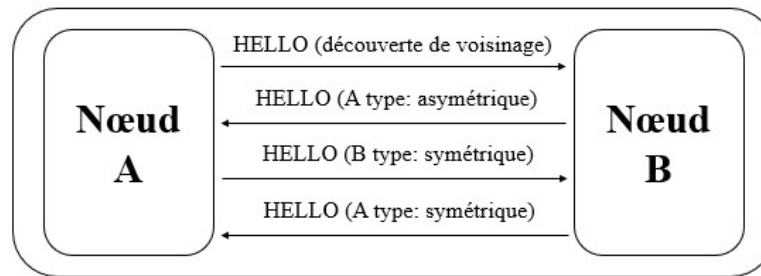


Figure 6: Mécanisme de détection des liens et des voisins dans le routage proactif[22]

Relais multipoint : dans le mécanisme de sélection de relais multipoints, chaque nœud du réseau doit développer ou maintenir sa propre procédure de relais multipoints de sorte que les nœuds qui sont choisis soient les seuls responsables de la fin des messages d'état de liaison que pour ces dispositifs et nœuds. Dans l'étape de redirection du trafic, tous les nœuds du réseau doivent établir ou maintenir leurs propres sélecteurs de relais multipoints pour chaque nœud.

Messagerie d'état de liaison et calcul d'itinéraire : la principale fonctionnalité de ce mécanisme de détection des liens est que tous les nœuds du réseau inondent ou diffusent des informations d'état de liaison afin de mettre à jour les nœuds grâce à l'envoi de paquets HELLO les uns aux autres.

Il y a fondamentalement deux optimisations principales d'état de liaison qui sont données ci-dessous [23] :

Les sélecteurs de relais multipoint sont utilisés pour le transfert des routes, c'est pourquoi il est préférable de les utiliser pour le transfert des informations d'état des liens. Ces sélecteurs de relais multipoints sont sélectionnés pour envoyer des messages d'état de liaison ce qui garantit la diminution de la taille et ce qui est très utile dans les messages d'état de liaison.

Dans la procédure d'état de lien, les nœuds sélectionnés doivent envoyer le message d'état de lien dans le réseau, ces messages sont appelés messages de contrôle de topologie (TC). Les TC ont un rôle très important dans le développement d'un réseau qui, parce qu'ils permettent la création de relations entre les nœuds.

1.2.5.2 Les protocoles réactifs

Le routage réactif est également connu sous le nom de protocole de routage à la demande puisqu'il ne maintient pas les informations de routage ou l'activité de routage aux nœuds du réseau s'il n'y a pas de communication[22]. Si un nœud souhaite envoyer un paquet à un autre nœud, ces protocoles recherchent l'itinéraire à la demande et établissent la connexion afin d'émettre et de recevoir le paquet. La découverte de route se produit en inondant les paquets de demande d'itinéraire sur tout le réseau. Le principal avantage de ce type de protocoles est la bonne gestion de la bande passante.

1.2.5.3 Les protocoles hybrides

Ces protocoles de routage introduisent un modèle hybride qui combine des protocoles de routage réactifs et proactifs [22]. Ils présentent les avantages des protocoles à vecteurs de distance et de ceux à état des liens et les fusionne dans un nouveau protocole. En général, les protocoles de

routage hybride sont basés sur un protocole à vecteur de distance mais contiennent de nombreuses caractéristiques et avantages des protocoles de routage à état de liaison.

1.3 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)

1.3.1 Introduction aux RCSF

Le développement des RCSF a commencé dans les années 1950s lorsque l'armée américaine a développé le système de surveillance acoustique (SOSUS) utilisé dans les capteurs acoustiques immergés. Certains des capteurs de SOSUS sont encore en service pour la surveillance de l'activité sismique. Après une interruption de près de trois décennies, l'Agence du Projet de Recherche Avancée pour la Défense (DARPA) aux États-Unis a lancé le programme Réseau de capteurs distribués (DSN) qui s'est concentré sur le développement de technologies et de protocoles nouvellement inventés dans le contexte de leur utilisation pour les réseaux de capteurs[24].

Simultanément, l'ARPANET a commencé la recherche et le développement des RCSF en impliquant de nombreuses institutions et industries[24]. La recherche et le développement sur les petits nœuds capteurs ont été initiés par les deux projets (Sensor web project) et (Smart dust project) de la NASA en 1998. L'un des objectifs était de créer un dispositif autonome de détection et de communication dans un espace d'un millimètre cube. D'autres premiers projets dans ce domaine ont débuté vers 1999, principalement dans le milieu universitaire à plusieurs endroits, notamment au MIT (Massachusetts Institute of Technology), à Berkeley et à l'Université de Californie du Sud.

Grâce aux progrès des technologies de communication sans fil et de l'électronique, les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), considérés comme une technologie clé de l'IoT[25], ont ouvert un nouveau champ d'application et de recherche dans le domaine des réseaux Ad hoc. Ils représentent un outil potentiellement polyvalent et peu coûteux pour mesurer ou surveiller divers phénomènes et permettre un déploiement plus facile et une meilleure flexibilité des dispositifs améliorant ainsi la fiabilité et l'efficacité des systèmes d'infrastructure.

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont composés d'un grand nombre de petits dispositifs (appelés capteurs) qui collectent des informations en coopérant les uns avec les autres[26]. Ces petits dispositifs sont composés de CPU (pour le traitement des données), d'une mémoire (pour le stockage des données), d'une batterie (pour fournir l'énergie) et d'un émetteur-récepteur (pour la réception et l'envoi de signal ou de données d'un nœud à l'autre). La taille de chaque nœud capteur varie selon le type d'application et son coût dépend de ses paramètres comme la taille de la mémoire, la vitesse de traitement et la capacité de la batterie.

Aujourd'hui, les réseaux de capteurs sans fil sont largement utilisés dans les secteurs commerciaux et industriels, par exemple dans la surveillance de l'environnement, la surveillance des habitats, les soins de santé, la surveillance des processus et d'activité. Leur utilisation augmente jour après jour et, dans le même temps, elle est confrontée au problème des contraintes énergétiques en termes de durée de vie limitée des batteries. Dans de nombreux cas (ex : applications de surveillance), il n'est pas souhaitable de remplacer les piles épuisées ou vidées de leur énergie. De nombreux chercheurs se sont intéressés à développer des protocoles efficaces en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil afin de surmonter de tels problèmes.

La défaillance d'un nœud peut interrompre l'ensemble du système ou l'application. Chaque nœud capteur peut être en mode actif où il consomme de l'énergie lors de la réception et transmission de données ou en mode veille où il éteint la fonction radio pour économiser l'énergie.

Une station de base est un appareil riche en ressources ayant une capacité illimitée d'alimentation, de communication et de stockage. Il peut s'agir d'un nœud statique ou d'un nœud mobile en fonction des applications et des scénarios, et il peut communiquer avec les nœuds capteurs pour collecter les données et les envoyer à l'utilisateur via le système de communication existant ou Internet. Chacun des capteurs est capable de détecter la zone de surveillance et d'acheminer les données vers le puits ou la station de base pour atteindre un objectif d'application. Une fois que le puits a reçu les données, il prend une décision appropriée en fonction des exigences de l'application. De ce fait, la transmission des données des capteurs au puits dans le RCSF forme naturellement un paradigme de trafic de type "plusieurs à un".

La communication directe entre tous les nœuds et le puits est évitée afin d'économiser les ressources énergétiques des nœuds, qui sont les plus sollicitées lorsqu'ils émettent des signaux radio de puissance maximale. L'aspect collaboratif, ainsi que l'absence d'infrastructure prédéfinie et planifiée permet de classer les RCSF en réseaux Ad hoc. Cependant, les RCSF sont un cas particulier en termes de limitation des ressources ainsi que du grand nombre de nœuds déployés dans une densité élevée. De ce fait, les protocoles de routage conçus pour les RCSF devraient garantir un fonctionnement en temps réel, car ils sont appliqués dans des domaines où les données sont détectées, traitées et transmises en fonction d'un événement qui mène à une action immédiate en respectant les critères suivants:

- La rapidité et la fiabilité dans les réactions aux changements qui prévalent dans le réseau.
- Capacité de fournir des données non redondantes à la station de base ou au puits en utilisant les données collectées par tous les nœuds capteurs du réseau.
- La minimisation du délai de transmission des données vers le puits à partir des nœuds capteurs entraînant une réponse rapide aux demandes dans le réseau.

En effet, l'activité de détection, de traitement et de communication avec une quantité limitée d'énergie suscite une approche de conception multicouche nécessitant généralement la prise en compte conjointe du traitement distribué des signaux et des données, du contrôle d'accès aux supports et des protocoles de communication.

1.3.2 Le déploiement des nœuds capteurs

Les RCSF sont particulièrement attrayants pour la communauté scientifique car ils permettent d'obtenir en permanence des mesures pendant toute la durée du déploiement à une résolution et à une échelle qui n'ont pu être atteintes auparavant. Étant donné les avantages offerts par les réseaux de capteurs sans fil par rapport aux réseaux câblés, comme la simplicité de déploiement, le faible coût d'installation, l'absence de câblage et la mobilité, les RCSF présentent une technologie attrayante et les études estiment que les RCSF permettent de réaliser des économies pouvant aller jusqu'à 90 % par rapport au coût de déploiement d'appareils câblés sur le terrain.

L'organisation des nœuds dans les RCSF est spécifique à l'application, on distingue deux types de déploiements : Un déploiement manuel déterministe où les capteurs sont répartis de manière structurée et l'information est dirigée par des moyens prédéterminés. Toutefois, dans certains cas, cela peut ne pas être possible, dans de telles circonstances, les RCSF permettent un déploiement non structuré où les nœuds sont répartis aléatoirement sur la zone de surveillance, ce dernier type de déploiement non structuré tend à nécessiter une densité de nœuds plus élevée que les déploiements structurés, car leur placement ne peut être optimisé pour obtenir une bonne couverture de l'environnement.

Contrairement à leurs ancêtres les réseaux Ad hoc, les RCSF sont des réseaux à ressources limitées, déployés de manière dense et sont sujets aux pannes. Le nombre de nœuds est supérieur de plusieurs ordres à celui des réseaux Ad hoc où les nœuds capteurs sans fil n'ont pas d'étiquettes d'identification globale.

1.3.3 Principaux composants d'un RCSF typique

Le réseau de capteurs sans fil se compose principalement des éléments suivants[27] :

- Champ de détection : un champ de captage peut être considéré comme la zone dans laquelle les capteurs sont placés.
- Nœuds capteurs : les nœuds capteurs sont le cœur du réseau. Ils sont chargés de recueillir les données et de les acheminer vers le puits.
- Le nœud puits: un puits est un nœud capteur qui a pour tâche spécifique de recevoir, de traiter et de stocker les données provenant des autres nœuds capteurs. Il sert à réduire le nombre total de messages qui doivent être envoyés, réduisant ainsi les besoins énergétiques globaux du réseau.
- Gestionnaire des tâches : le gestionnaire de tâches est le point de contrôle centralisé au sein du réseau, il extrait les informations du réseau et diffuse les informations de contrôle vers ce dernier. Il sert également de passerelle vers d'autres réseaux, de puissant centre de traitement et de stockage de données et de point d'accès pour une interface humaine. Il peut s'agir d'un ordinateur portable ou d'un poste de travail.

1.3.4 Applications des RCSF

Les applications typiques des RCSF peuvent être classées en deux catégories : la surveillance et le suivi : Les applications de surveillance peuvent impliquer la collecte périodique de données ou peuvent être déclenchées par des événements. Dans une application déclenchée par événement, lorsqu'un certain événement se produit dans le champ de détection, les nœuds capteurs collectent les données relevées et relatives à cet événement particulier et les transmettent au puits. Ces applications emploient généralement une stratégie de gestion de l'alimentation très stricte en raison de l'alimentation limitée des nœuds capteurs et de la longue durée de vie requise par l'application.

Bien que la recherche dans les RCSF ait d'abord été motivée par des applications militaires, les réseaux de capteurs sans fil ouvrent un vaste champ d'application et de recherche, leurs applications vont de la distribution d'énergie dans les réseaux dits " Smart Grids "[28] à la surveillance

environnementale des glaciers, des habitats, de la pollution de l'eau et de l'air, en passant par les systèmes d'alerte pour détecter les indicateurs d'incendies de forêt ou d'activité volcanique avant que la catastrophe ne se déclare. D'autres applications sont en cours de développement pour la surveillance, la domotique, les applications médicales, agricoles et industrielles[28]:

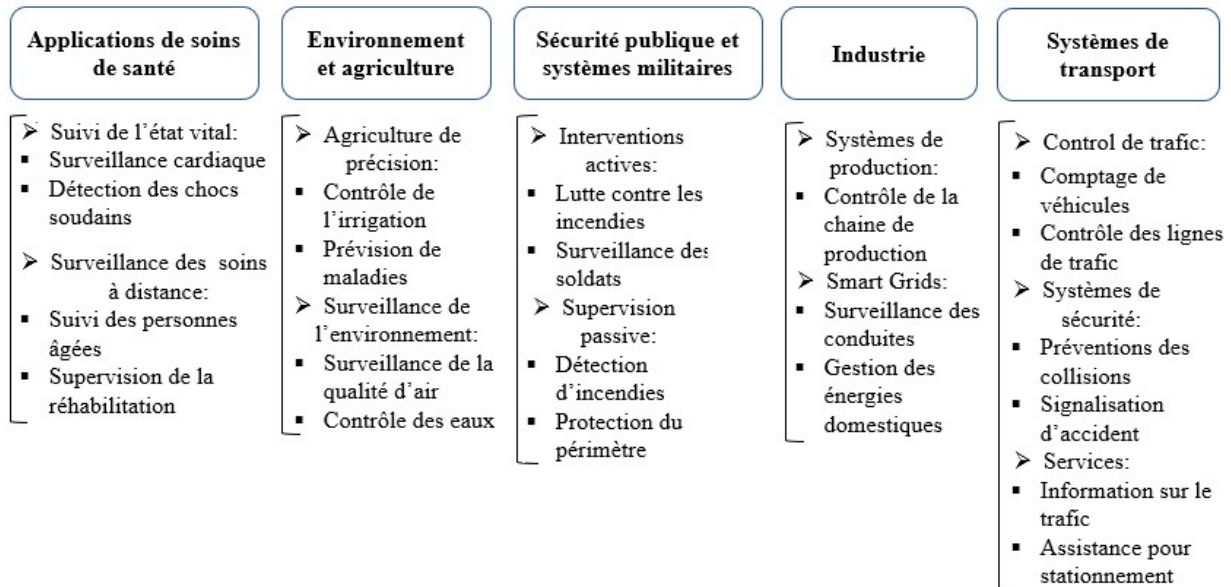


Figure 7: Classification des applications des RCSF[29]

1.3.4.1 Applications médicales

Les RCSF utilisés dans le domaine de la santé doivent répondre à plusieurs exigences[30]. En particulier, ils doivent garantir des délais de livraison des données en temps réel, la confidentialité et le contrôle d'accès. Ils doivent également soutenir la mobilité et fournir une qualité de service. En effet, dans le contexte de la détection précoce et critique de situations d'urgence comme les crises cardiaques et les chutes soudaines, la détection en temps réel est décisive[31]. Dans ce cas, l'identification de la situation et la prise de décision doivent se faire le plus rapidement possible pour sauver des minutes précieuses et la vie de la personne. Par conséquent, le délai de la livraison des données entre les nœuds et l'utilisateur final doit être court afin de répondre aux exigences dures du temps réel. Il est également nécessaire que les réseaux de soins de santé soutiennent la mobilité des nœuds pour assurer la continuité des services lorsque les patients et les soignants se déplacent. De plus, les données de santé échangées sont sensibles et les informations médicales doivent être gardées confidentielles en limitant l'accès aux personnes autorisées[30]. Ainsi, la réalisation de la confidentialité et du contrôle d'accès par le biais d'un réseau de communication nécessite la mise en place de mécanismes de protection des données et d'authentification des utilisateurs. Lorsque les RCSF sont intégrés dans un système d'information hospitalier global, les données critiques telles que les alarmes partagent la bande passante avec des données moins sensibles telles que la température ambiante. Par conséquent, la priorisation du trafic est essentielle pour satisfaire aux exigences strictes en matière de délais par le biais de l'approvisionnement en QoS[32].

1.3.4.2 Applications dans l'environnement et l'agriculture

Les principales exigences des applications environnementales et agricoles sont la scalabilité, la couverture et la prolongation de la durée de vie[33]. Les champs agricoles, les pâturages et les sites surveillés peuvent atteindre plusieurs dizaines d'hectares, de sorte que le nombre de capteurs déployés varie de plusieurs dizaines à plusieurs milliers. C'est pourquoi la scalabilité est une question importante lors du développement de protocoles pour supporter un grand nombre de nœuds et assurer une couverture complète de la zone contrôlée. Des études ont montré que les conditions extérieures pouvaient être très dures et avoir un impact sur la faisabilité de la communication. Généralement, le feuillage, la pluie ou l'humidité peuvent entraîner la rupture des liaisons inter-nœuds, ce qui entraîne des communications très variables et imprévisibles. Des schémas de routage tolérants aux pannes doivent donc être mis en place pour assurer la couverture de la zone et faire face aux pannes ou aux déconnexions temporaires. Dans la plupart des applications de surveillance de l'environnement, les nœuds sont statiques au fur et à mesure qu'ils sont déployés sur le système dans les champs, dans les forêts ou le long des rives des rivières. Néanmoins, la mobilité doit être prise en compte que cela soit souhaité ou non. Un déplacement de capteur non désiré peut être causé par de fortes pluies, du vent, des animaux ou des moteurs. Lorsque la mobilité est intentionnelle, les nœuds et les puits sont embarqués dans des véhicules ou un support en mouvement naturel tel que des animaux.

1.3.4.3 Applications militaires et d'urgence

En raison de leur nature critique, les applications militaires et de sécurité publique se caractérisent par la nécessité de délais courts, la différenciation des services et l'intégrité des données. En outre, les demandes d'intervention active doivent soutenir la mobilité et la surveillance passive doit assurer la couverture. Premièrement, le délai de livraison est un paramètre décisif à prendre en compte lors de la conception d'un système de sécurité publique, car dans les applications d'urgence, un rapport d'alarme opportun est nécessaire pour que le système soit réactif. En outre, les systèmes de sécurité publique et les systèmes militaires traitent à la fois les données de surveillance quotidienne et les données d'alerte. Par conséquent, les alarmes de détection d'anomalies doivent être envoyées en paquets ayant priorité sur les rapports réguliers par le biais d'un mécanisme efficace de différenciation de service. Enfin, les deux types d'applications de sécurité publique devraient garantir l'intégrité des données : en cas d'intervention active, les données corrompues pourraient mettre en danger les agents en donnant de fausses informations au siège ; en cas de surveillance passive, une personne mal intentionnée pourrait contourner un système de surveillance en envoyant de fausses données. Dans le cas d'une intervention active, la mobilité est inhérente à l'architecture puisque des capteurs portables sont portés par les travailleurs. De plus, les applications d'intervention active sont souvent caractérisées par leur utilisation dans des conditions environnementales difficiles. Dans ces conditions, le réseau doit être résistant à défaillance du nœud et mauvaise qualité de la liaison grâce à un schéma de routage tolérant aux pannes. La surveillance de l'infrastructure nécessite le déploiement de capteurs statiques non reliés entre eux afin de superviser la zone d'intérêt. Par conséquent, les applications de surveillance passive peuvent se heurter aux problèmes de couverture lorsque la surveillance complète d'un bâtiment ou d'un tunnel l'exige.

1.3.4.4 Application dans le bâtiment

Le faible coût d'installation des systèmes de réseaux de capteurs sans fil permet de répondre aux besoins du vaste marché de la modernisation et des nouvelles constructions[34]. Par rapport aux capteurs câblés traditionnels, les capteurs sans fil offrent des avantages tels qu'une plus grande flexibilité pour localiser et reconfigurer les capteurs, l'élimination des fils dans les endroits potentiellement dangereux et une maintenance réseau plus facile.

L'augmentation de l'efficacité énergétique des bâtiments commerciaux est l'un des principaux moteurs de l'adoption des RCSF dans l'automatisation des bâtiments[34]. L'automatisation des bâtiments couvre tous les aspects du contrôle des systèmes du bâtiment, y compris le chauffage et la climatisation, le contrôle de l'éclairage et les systèmes de sécurité.

1.3.4.5 Applications dans l'industrie

Les principales exigences des applications industrielles sont le respect des délais, la robustesse et la sécurité[35]. En effet, les produits manipulés dans l'industrie peuvent être très dangereux et nécessitent une attention particulière lors du stockage et de la manutention. Par exemple, dans une raffinerie de pétrole, en raison de leur grande volatilité et de leur inflammabilité, les produits à bas point d'ébullition s'évaporent facilement, formant des vapeurs inflammables. Ainsi, la pression dans un réservoir ou la température d'un four peut rapidement devenir critique. C'est pourquoi des délais stricts doivent être assurés afin que le temps qui s'écoule entre la détection d'une anomalie et l'intervention de l'opérateur permette de résoudre l'incident. En outre, dans de nombreuses industries, les réseaux sont soumis à diverses perturbations telles que les composants défectueux, les pannes de nœuds, les déconnexions et la congestion. Ceci est dû au fait que les capteurs fonctionnent dans des conditions difficiles, car les nœuds placés dans les pipelines ou les réservoirs subissent des pressions et des températures élevées, ou des vibrations continues. Ainsi, les implémentations de l'industrie doivent garantir la fiabilité des données. De plus, compte tenu de la sensibilité des données, de leur disponibilité, de leur intégrité, de leur authenticité et de leur caractère confidentiel, les problèmes de sécurité doivent être pris en considération lors de la conception un réseau de communication industriel.

1.3.4.6 Systèmes de transport

En raison des caractéristiques vitales des applications de transport, les RCSF conçus dans ce domaine doivent garantir des délais très courts en temps réel, la sécurité et la qualité de service tout en favorisant la mobilité[36]. Par exemple, les systèmes liés à la sécurité de la conduite doivent assurer des délais de bout en bout très courts afin de garantir des temps de réponse. Il s'agit là du principal défi de ces applications, car la vie des personnes est en jeu. Pour les applications de surveillance de la circulation, des informations en temps opportun sont également nécessaires pour assurer une gestion efficace et en temps réel du flux des véhicules. À l'avenir, les systèmes de transport intelligents (STI) et les systèmes de sécurité et les applications de service partageront le même canal sans fil qui nécessite des outils pour intégrer la différenciation des services[36]. En effet, les informations critiques et le contrôle du trafic devraient avoir une priorité plus élevée que les autres paquets de services. En outre, les communications de véhicule à véhicule et de véhicule à infrastructure sont limitées par la vitesse des véhicules. La mobilité est donc inhérente au domaine

automobile car les nœuds évoluent dans un environnement extrêmement dynamique. Enfin, les caractéristiques vitales de certaines applications soulèvent des problèmes de sécurité dans le réseau de transport, le caractère vital de certaines applications pose des problèmes de sécurité dans les réseaux de transport qui peuvent faire l'objet d'une cyber-attaque. Ainsi, le réseau doit être protégé contre la corruption des données qui pourrait donner de fausses informations sur le trafic ou les conditions de circulation sur la route. En assouplissant le facteur de puissance, les nœuds peuvent prendre en charge des algorithmes de cryptage sophistiqués pour fournir un niveau de sécurité plus élevé.

1.3.4.7 Réseaux de capteurs souterrains et sous-marins

Les réseaux de capteurs souterrains et sous-marins [37] sont des types émergents de RCSF qui sont utilisés dans différentes catégories d'applications, notamment la surveillance environnementale, la sécurité publique et l'industrie. Ils se distinguent des réseaux terrestres traditionnels par le fait que les capteurs sont déployés dans des environnements spéciaux qui rendent les communications difficiles et influent sur leur facilité de déploiement. Les réseaux de capteurs souterrains sont constitués de capteurs enfouis dans des matériaux denses comme le sol ou le béton et qui communiquent entre eux. Ces réseaux peuvent être utilisés pour la déclaration de l'humidité du sol en agriculture, la supervision des infrastructures, la détection des intrusions et les systèmes de transport. Ils reposent sur des capteurs immergés et sont utilisés dans diverses applications telles que la surveillance de l'océan, la surveillance de la qualité de l'eau, la prévention des catastrophes, la surveillance et le contrôle des canalisations.

Les réseaux de capteurs souterrains et sous-marins partagent des exigences communes telles que la robustesse et la couverture[37]. La caractéristique principale de ces réseaux est leur canal de perte dû à des conditions environnementales extrêmes. En effet, les communications acoustiques pour les capteurs sous-marins et les ondes électromagnétiques pour les capteurs souterrains souffrent d'une vitesse de propagation, d'un bruit et d'une perte de chemin plus faibles, ce qui conduit à la dégradation du signal. Ils nécessitent donc l'élaboration de protocoles de communication spécifiques pour assurer la fiabilité de l'application. La couverture est également un problème car il n'est pas toujours possible de déployer de manière optimale les nœuds en raison du profil du terrain, des coûts et des efforts nécessaires pour l'excavation. De plus, ces réseaux sont intrinsèquement tridimensionnels (ce qui soulève des questions supplémentaires) puisque les dispositifs peuvent être déployés à des profondeurs variables selon le phénomène à surveiller.

L'objectif des RCSF est de fournir une solution sans fil flexible, robuste, économique et nécessitant peu de maintenance. Les principales exigences que nous avons identifiées dans les différentes applications sont l'évolutivité, la couverture, la latence, la QoS[32], la sécurité, la mobilité et la robustesse. C'est pourquoi la conception des RCSF nécessite le développement de solutions d'efficacité énergétique qui répondent à un ensemble spécifique d'exigences.

1.3.5 Composition des RCSF

Avant de commencer notre travail d'analyse de la consommation d'énergie, plusieurs points doivent être abordés : les capacités matérielles des capteurs, l'architecture du réseau et les technologies de communication.

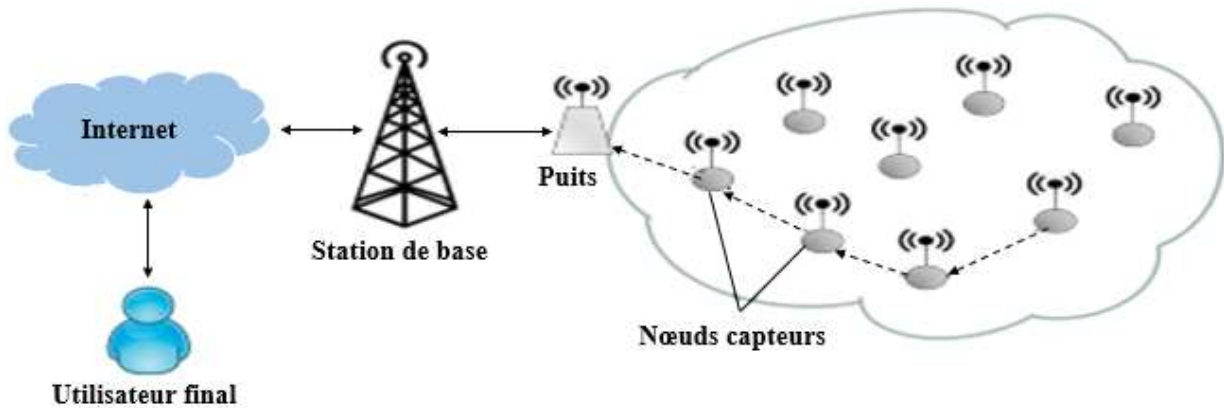


Figure 8: Architecture d'un RCSF[26]

Le nœud capteur est l'une des parties principales d'un RCSF, la (Figure 9) présente l'architecture d'un nœud capteur générique. Un capteur est essentiellement composé d'unités de détection, de stockage de données, de traitement de données et de communication, et est alimenté par des piles.

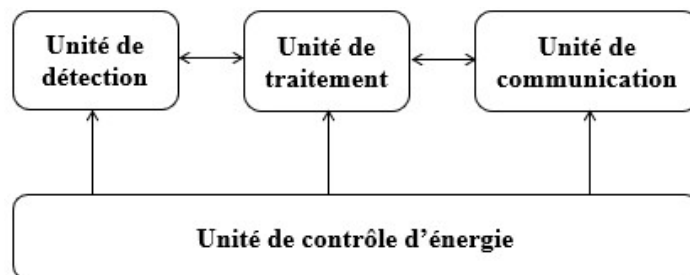


Figure 9: Composition d'un nœud capteur[27]

- **Unité de détection** : généralement constituée d'un dispositif de capture physique qui saisit les mesures et les convertit en signaux analogiques et de convertisseurs analogique-numérique (ADC) qui convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques.
- **Unité de traitement** : contrôle les procédures qui permettent au nœud de collaborer avec d'autres nœuds pour effectuer les tâches d'acquisition et stocker les données collectées.
- **Module de communication** : composé d'un émetteur-récepteur permettant la communication entre les différents nœuds du réseau via un support de communication radio.
- **Batterie** : source unique d'énergie qui n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable, elle représente la principale contrainte lors de la conception des protocoles de routage des réseaux de capteurs.

Plus particulièrement, la radio est utilisée pour communiquer par des liaisons sans fil avec d'autres capteurs et la station de base, tandis que l'unité de détection mesure des paramètres externes (par exemple la température, l'accélération, le niveau sonore). Les capteurs peuvent être équipés d'éléments supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS), ou des composants de récolte de puissance. Le coût des nœuds doit être maintenu bas pour minimiser le coût global du réseau et

un bon compromis doit être trouvé entre le nombre de caractéristiques fournies par le capteur et son coût.

Il existe deux types d'unités de mémoire en fonction des différents besoins de stockage dans un nœud capteur. Le microprocesseur lui-même contient de la mémoire sur puce utilisée pour stocker le logiciel système. Il y a aussi, généralement, une mémoire flash disponible où les utilisateurs peuvent stocker leurs propres applications et données. Quant à l'unité de calcul, elle est constituée d'un microprocesseur responsable de la gestion des protocoles de communication et du traitement des données collectées par les capteurs. En ce qui concerne l'unité de communication, elle combine les fonctionnalités de l'émetteur et du récepteur. Les fréquences de communication des nœuds capteurs se situent entre 433 MHz (dans certaines des premières générations de nœuds capteurs) et 2,4 GHz (la fréquence la plus utilisée). L'unité de communication possède quatre états de fonctionnement : émission, réception, inactif et en veille.

1.3.6 Modélisation graphique des RCSF

La théorie des graphes est un domaine des mathématiques où l'on peut décrire, modéliser, analyser et représenter graphiquement de nombreuses situations du monde réel y compris la communication, les tâches de planification et les réseaux du monde réel afin de nous aider à comprendre facilement de nombreuses propriétés des problèmes. En conséquence, ce domaine a gagné en popularité et est devenu une zone attrayante pour la communauté des chercheurs.

Les RCSF peuvent être représentés par un graphique avec un ensemble V de sommets (nœuds) et E de bords qui est représenté par $G = (V ; E)$. Où V exprime le nombre total de sommets et E indique le nombre total de bords. Les sommets sont reliés entre eux par des arêtes. En particulier, chaque bord relie exactement deux sommets.

1.3.7 Pile protocolaire des RCSF

L'architecture de communication du RCSF peut être classée en différentes couches puisque tous les protocoles de communication sont basés sur les sept couches du modèle d'interconnexion des systèmes ouverts (OSI) [38]. Cependant, les RCSF n'adhèrent pas aussi étroitement à l'architecture en couches du modèle OSI que les autres réseaux. Comme le montre la **(Figure 10)**, la pile de protocoles peut être divisée en cinq couches principales: physique, liaison de données, réseau, transport et application. Néanmoins, le modèle en couches est également utile dans les RCSF pour catégoriser divers protocoles.

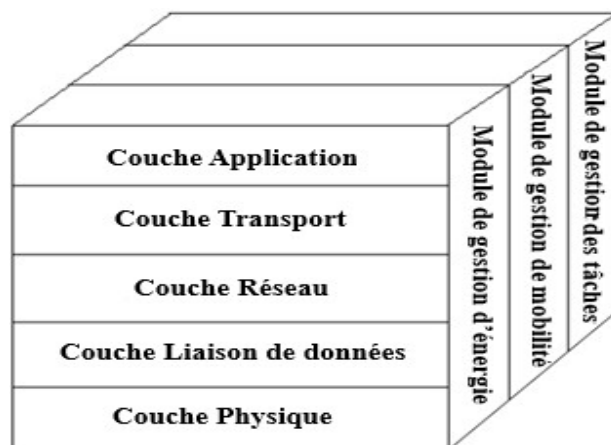


Figure 10: Pile protocolaire des RCSF [38]

Chaque couche fournit des services à la couche supérieure et reçoit des services de la couche inférieure.

La couche physique doit fournir des techniques robustes de modulation, de transmission et de réception.

La couche MAC et la couche de liaison de données doit être consciente de la puissance et en mesure de minimiser les impacts.

La couche Réseau est responsable du routage des données et particulièrement de la sélection des chemins d'accès pour l'envoi des données sur le réseau.

La couche de transport aide à maintenir le flux de données et est particulièrement nécessaire lorsque l'accès au système est prévu via Internet ou d'autres réseaux externes. Contrairement aux protocoles tels que le protocole TCP (Transmission Control Protocol) et le protocole UDP (User Datagram Protocol), le schéma de communication à sauts multiples du RCSF n'est pas basé sur l'adressage global. Par conséquent, de nouveaux systèmes qui peuvent diviser la communication de bout en bout, probablement au niveau des puits peuvent être nécessaire.

La couche application définit un ensemble standard de services et de primitives d'interface. C'est le cas, par exemple, de la plate-forme SNSP (Sensor Network Services Platform).

Orthogonalement à ces cinq couches, on trouve les plans d'alimentation, de mobilité et de gestion des tâches qui sont chargés de surveiller l'alimentation, les mouvements et la répartition des tâches entre les nœuds capteurs, ce qui aide ces derniers à coordonner les tâches et à réduire la consommation d'énergie globale.

1.3.8 Exigences et paramètres d'implémentation des RCSF

Le succès du déploiement des RCSF dans différentes applications dépend des paramètres des nœuds capteurs. Bien que les domaines d'application soient très divers, les architectures logicielles et matérielles utilisées dans ces déploiements ont tendance à être très similaires. Les RCSF sont conçus pour comporter un grand nombre de nœuds déployés en haute densité, et peuvent comporter

un ou plusieurs nœuds puits chargés de la collecte des données envoyées par les nœuds capteurs et servant de passerelles vers des réseaux externes, comme par exemple l'Internet. Les matériels typiques utilisés sont des plates-formes avec un microcontrôleur doté d'une mémoire divisée en ROM et RAM, un dispositif radio de faible puissance, et des circuits supportant les modes veille de faible puissance pour prolonger la durée de vie de la batterie.

Comme les RCSF sont conçus pour fonctionner sans surveillance, ils doivent faire face aux problèmes imposés par [27] :

Energie limitée : dans un réseau de capteurs sans fil, chaque nœud est équipé d'un capteur dont les dispositifs fonctionnent à la base de l'alimentation fournie par la batterie connectée. Pour avoir de meilleures performances, le réseau doit être exploité pendant une longue période, et comme le capteur est de petite taille, la batterie a une faible capacité et l'énergie disponible est très limitée. Dans ce contexte, le chargement ou le remplacement de la batterie est coûteux voire impossible. Tous les nœuds capteurs du réseau utilisent une certaine quantité d'énergie réseau qui les aide à effectuer certaines activités comme la détection ou le traitement ou même la formation de groupes dans la zone réseau. La quantité d'énergie utilisée par les nœuds capteurs au sein du réseau est appelée consommation d'énergie du réseau. Une alternative pour alimenter les nœuds de capteurs serait de récupérer l'énergie de l'environnement en se basant sur des panneaux solaires dans les espaces ouverts, ou des nano-générateurs transformant le mouvement en électricité. Indépendamment de la source d'alimentation, l'économie d'énergie est importante dans les RCSF car la durée de vie du réseau est directement influencée par les ressources d'alimentation des nœuds.

Mémoire très limitée: pour réduire les coûts et la consommation d'énergie, la mémoire disponible sur les nœuds capteurs est réduite et est de l'ordre de quelques dizaines de ko.

Auto-organisation: de nombreux facteurs dans les déploiements des RCSF rendent l'auto-organisation souhaitable, des déploiements non structurés comptant jusqu'à des milliers de nœuds ne seraient pas réalisables si le réseau n'était pas en mesure de se configurer et de réagir aux changements qui pourraient être causés par des défaillances de nœuds ou des inondations environnementales. Limiter l'interaction avec un RCSF à un ou à quelques nœuds puits apporte donc un gain significatif dans leur gestion.

Communication sans fil perdue: la communication sans fil peut être perturbée par les interférences dues à l'environnement.

Programmation et reprogrammation du réseau: la programmation d'un réseau sans fil avec de nombreux nœuds n'est pas facile. De nouvelles solutions doivent être trouvées.

Défaillance des nœuds: il est peu probable qu'un RCSF s'écrase complètement, mais comme certains nœuds meurent et que d'autres génèrent des données bruyantes ou malveillantes, les mesures du système global peuvent devenir faussées ou incohérentes.

Qualité de la communication: les réseaux de capteurs ont une très faible qualité de communication qui dépend de l'état et de l'environnement de déploiement.

Disponibilité des ressources : lorsque les ressources requises par le réseau de capteurs ne sont pas disponibles, le réseau s'efforce de fournir la QoS souhaitée[32].

Latence: la latence est définie par le temps qu'il faut à un nœud pour détecter, surveiller et communiquer l'activité. Cela dépend également de l'application. Puisque les nœuds capteurs recueillent l'information, la traitent et l'envoient à la destination, la latence d'un réseau est calculée en fonction de ces activités ainsi que du temps qu'il faut à un capteur pour transmettre les données dans le cas d'un trafic à forte charge ou d'un réseau à faible densité.

Scalabilité: les réseaux de capteurs sans fil sont composés d'un grand nombre de nœuds dont d'autres peuvent être ajoutés au stade de la conception. De ce fait, la scalabilité est un facteur important dans les réseaux de capteurs sans fil et tous les nœuds du réseau doivent être capables de s'adapter aux modifications de la structure du réseau.

Le temps de traitement: désigne le temps pris par un nœud du réseau pour effectuer toutes les opérations à partir de la détection jusqu'au traitement des données ou jusqu'à leur stockage dans les tampons et leur transmission sur le réseau. Les données recueillies par les capteurs peuvent contenir des données redondantes. Ainsi, l'agrégation des données est nécessaire afin qu'elles ne puissent pas être transmises plusieurs fois et afin de minimiser le taux de l'énergie consommée.

Schéma de transmission: les nœuds capteurs collectent les données et les transmettent au puits ou à la station de base en utilisant un routage à plat ou en mode multi sauts.

1.3.9 Topologie des RCSF

En général, un RCSF se compose d'un certain nombre de nœuds capteurs et d'une passerelle pour la connexion sur Internet. Le processus général de déploiement d'un RCSF est le suivant : tout d'abord, les nœuds capteurs du réseau diffusent leur état et reçoivent celui des autres nœuds pour se détecter l'un l'autre. Deuxièmement, ils s'organisent en un réseau connecté selon une certaine topologie (linéaire, étoile, arbre, etc.). Finalement, les routes appropriées sont construites pour transmettre les données récoltées.

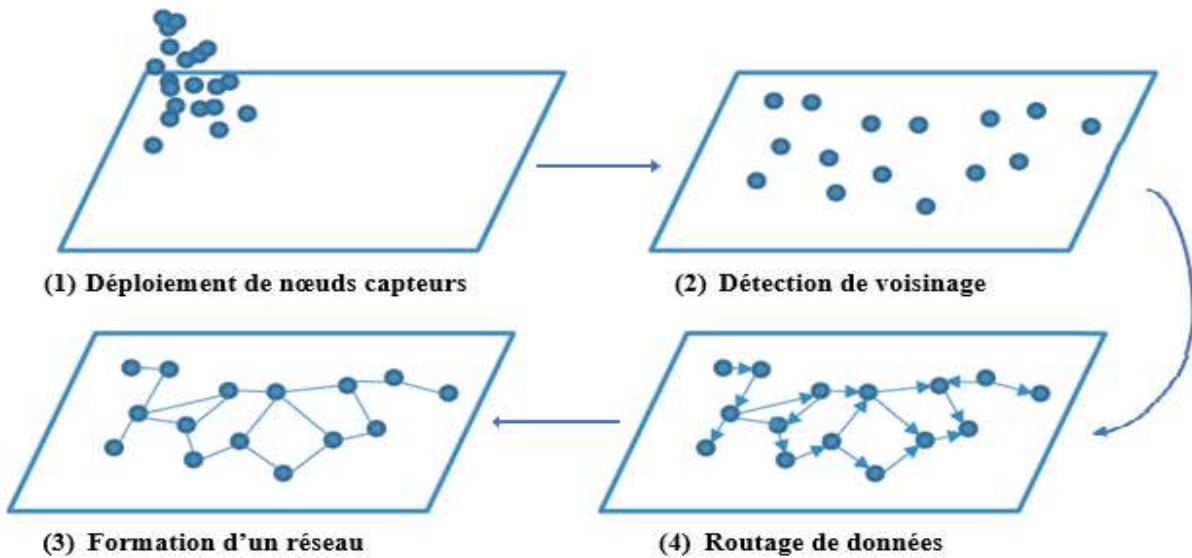


Figure 11: Processus de déploiement et de routage dans les RCSF[39]

La topologie des réseaux RCSF présente de grands avantages en termes de flexibilité et de fiabilité par rapport aux autres topologies de réseaux [27] et l'approche de gestion auto-organisée des nœuds du réseau peut considérablement améliorer la robustesse du réseau. Déterminer la meilleure topologie parmi les nœuds afin de fournir un réseau connecté pour acheminer les paquets vers la destination est une opération importante dans les RCSF. Plusieurs facteurs sont importants dans le choix d'une topologie appropriée, tels que le déploiement et la maintenance économes en énergie pendant la durée de vie du réseau, afin que le réseau atteigne une connectivité maximale avec une consommation énergétique minimale. Les protocoles de contrôle de topologie visent à établir une topologie de réseau résiliente tout en minimisant la consommation d'énergie lors de l'établissement et de la maintenance de la topologie.

1.3.10 Agrégation de données dans les RCSF

Dans les réseaux de capteurs à haute couverture, les informations communiquées par les nœuds voisins ont un certain degré de redondance, ce qui induit une transmission de données séparément dans chaque nœud tout en consommant de la bande passante et de l'énergie de l'ensemble du réseau de capteurs et raccourcit la durée de vie du réseau. Pour éviter ces problèmes évoqués ci-dessus, des techniques d'agrégation de données ont été introduites. L'agrégation de données est le processus d'intégration de plusieurs copies d'informations en une seule copie efficace et capable de répondre aux besoins des utilisateurs[40], elle permet à la fois d'économiser de l'énergie et d'obtenir des informations précises. L'énergie consommée pour la transmission des données est beaucoup plus importante que pour le traitement des données dans les réseaux de capteurs. Par conséquent, avec la capacité de calcul et de stockage locale du nœud, des opérations d'agrégation de données sont effectuées pour supprimer de grandes quantités d'informations redondantes de sorte à réduire au minimum le volume de transmission et économiser l'énergie.

Dans un environnement réseau complexe, il est difficile d'assurer l'exactitude de l'information obtenue uniquement en collectant quelques échantillons de données à partir des nœuds capteurs

distribués. Par conséquent, le suivi des données d'un même objet nécessite le travail collaboratif de plusieurs capteurs ce qui améliore efficacement la précision et la fiabilité des informations obtenues.

1.4 Le routage dans les RCSF

Le routage est le processus qui permet le transfert de données sur un réseau d'une source à une destination. Cela se fait en deux étapes : Tout d'abord, il faut établir dans le réseau les chemins le long desquels les données peuvent être transmises si l'émetteur et le récepteur ne sont pas sur la même liaison. Une fois les routes sélectionnées, la traçabilité des données est transférée d'un point final de la transmission via des nœuds intermédiaires vers l'autre point final. Comme le routage est une tâche importante et coûteuse dans les réseaux RCSF[41], les protocoles de routage devraient être économes en énergie pour augmenter la durée de vie du réseau[42]. Dans les réseaux de capteurs homogènes, tous les nœuds sont identiques et les tâches de routage sont réparties également entre les nœuds, tandis que dans les réseaux hétérogènes, les nœuds ont des capacités différentes. Les nœuds à haute capacité peuvent se voir confier davantage de responsabilités et la consommation globale d'énergie peut être réduite en optimisant les dispositions.

Les protocoles de routage opèrent sur des topologies telles que la topologie en arbre, le maillage, les clusters, etc... afin d'acheminer les données vers la destination de telle sorte que les données atteignent leur destination de la meilleure façon possible. Ceci est déterminé par une ou plusieurs métriques en fonction des exigences de l'application. Il existe toute une série de protocoles de routage pour les réseaux RCSF utilisant des stratégies différentes[43]. L'inondation est la façon la plus simple pour diffuser l'information dans un RCSF, chaque nœud qui reçoit de nouvelles informations les transmet à tous ses voisins jusqu'à ce qu'elles atteignent leur destination. Pour éviter les explosions de diffusion, plusieurs mécanismes sont disponibles, par exemple : les nœuds vérifient les doublons, c'est-à-dire les messages qu'ils ont déjà reçus, et les paquets peuvent contenir des informations sur le nombre de fois où ils sont autorisés à être retransmis.

Tout en étant facile à mettre en œuvre, l'inondation présente plusieurs inconvénients : entre autres, les nœuds peuvent recevoir des messages dupliqués et une grande quantité d'énergie est gaspillée car il n'y a pas de mécanisme pour inclure des contraintes énergétiques.

D'autres protocoles précalculent périodiquement les routes, tandis que d'autres ne le font que sur demande, c'est-à-dire lorsqu'un paquet de données doit être transmis. Ce mode de fonctionnement est utilisé pour distinguer les différents types de protocoles de routage. La (**Figure 12**) présente une classification des protocoles de routage dans les RCSF basée sur la structure du réseau et sur les opérations [44].

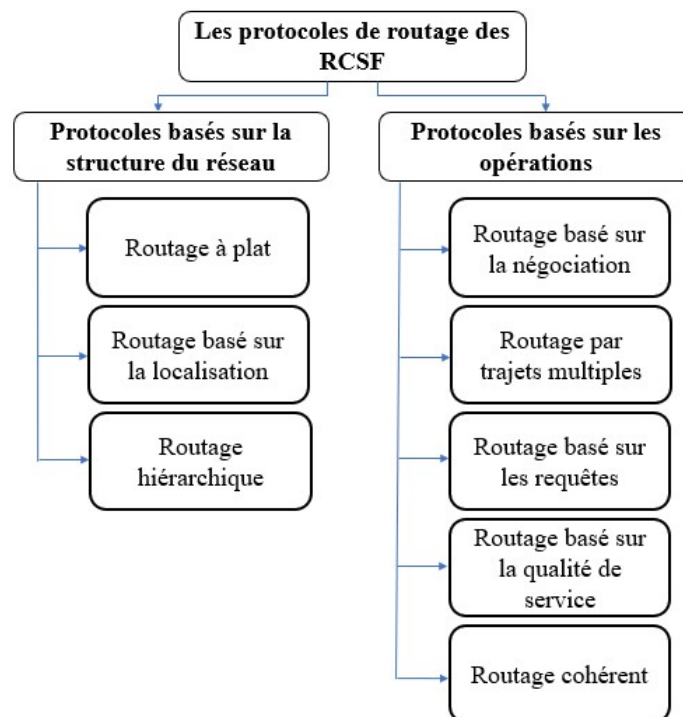


Figure 12: Classification des protocoles de routage des RCSF[45]

1.4.1 Protocoles de routage basés sur la structure du réseau

Les protocoles de routage basés sur la structure sont à leur tour classés en routage plat, routage hiérarchique et routage basé sur la localisation. Les protocoles qui entrent dans ces catégories respectent les contraintes de conception liées à la structure du réseau.

1.4.1.1 Routage à plat

Il s'agit d'une technique de routage dans laquelle tous les nœuds capteurs jouent les mêmes rôles, tels que la collecte de données et la communication avec le puits, c'est-à-dire que toutes les données collectées dans la zone de surveillance peuvent être identiques ou dupliquées du fait que tous les nœuds capteurs ont la même manière de fonctionner.

1.4.1.2 Routage basé sur la localisation

Dans ce type de routage, tous les nœuds capteurs sont gérés en fonction de leur emplacement. En fonction de l'intensité des signaux entrants, il est possible de calculer la distance du nœud le plus proche, de plus, tous les nœuds du réseau échangent des données afin d'avoir une vue globale sur leur voisinage. Comme l'énergie est le principal facteur de conception des protocoles de routage, les schémas basés sur la localisation exigent que les nœuds passent du mode actif au mode veille lorsqu'il n'y a aucune activité afin de garantir l'efficacité énergétique.

1.4.1.3 Routage hiérarchique

La notion de hiérarchie a été introduite dans plusieurs protocoles de routage des RCSF afin d'aborder les questions de scalabilité et de préservation d'énergie de manière différente, dans le but d'éviter une surcharge des nœuds puits par un trop grand nombre de messages reçus et de réduire ainsi le volume global des transmissions de messages. Pour se faire, les nœuds sont regroupés en clusters, qui comportent un nœud désigné comme tête ou chef de cluster, et l'information est relayée à ce dernier qui regroupe et agrège les données pour réduire le nombre de messages qui seront envoyés vers le puits. Avec cette stratégie, la communication se fait en mode multi-sauts relayant l'information sur les nœuds voisins, ce qui allège les tâches de communication et préserve l'énergie à mesure que le coût énergétique de la communication radio augmente avec la distance. Le protocole LEACH (Low energy adaptive clustering hierarchy) est l'un des premiers protocoles de routage à appliquer cette stratégie.

1.4.2 Protocoles de routage basés sur les opérations

Selon la base opérationnelle, les protocoles de routage de cette catégorie sont classés comme suit:

Protocoles de routage fondés sur la négociation, routage à chemins multiples, routage basé sur des requêtes, la qualité de service (QoS)[32] et la cohérence.

1.4.2.1 Routage basé sur la négociation

Ces protocoles utilisent des descripteurs codés à haut niveau afin d'éliminer et supprimer les informations dupliquées et empêcher l'envoi de données redondantes vers les nœuds voisins ou vers la station de base en exécutant plusieurs opérations sur les messages qui doivent être transmises.

1.4.2.2 Protocoles de routage basés sur des chemins multiples

Les conventions de direction multi-trajets s'attaquent à la règle selon laquelle une meilleure exécution peut être obtenue en enregistrant plus d'une manière plausible. Dans ces protocoles, les nœuds envoient les données collectées sur plusieurs chemins plutôt que d'utiliser un seul chemin. La fiabilité et la tolérance aux pannes du réseau augmentent car il existe, dans la mesure du possible, une voie alternative en cas de défaillance de la voie principale.

1.4.2.3 Protocoles de routage basés sur des requêtes

Le routage basé sur des requêtes propage l'utilisation des requêtes émises par la station de base demandant certaines informations aux nœuds du réseau responsables de la détection et de la collecte des données. Ce processus est connu sous le nom de diffusion dirigée où la station de base envoie des messages d'intérêt qui transitent dans le réseau en passant par tous les nœuds capteurs. Tout nœud disposant des données cohérentes avec le message reçu envoie les données collectées ainsi que le message d'intérêt vers la station de base. Ainsi, l'agrégation des données est effectuée le long des routes et moins d'énergie est consommée.

1.4.2.4 Routage basé sur la QoS

Les premiers protocoles de routage des RCSF ont été axés sur la recherche d'un itinéraire réalisable d'une source à une destination sans tenir compte d'une optimisation de l'utilisation des ressources du réseau ou des exigences spécifiques des applications. Pour prendre en charge la QoS[32], le problème essentiel est de trouver une route avec suffisamment de ressources disponibles pour répondre aux contraintes de QoS[46] et éventuellement d'ajouter quelques optimisations supplémentaires telles que trouver le plus bas coût ou le plus stable et qui répond aux contraintes de qualité de service.

Les défis de la prise en charge de la QoS dans les RCSF sont de savoir comment réserver la bande passante et comment garantir le délai spécifié pour les flux de données en temps réel[46]. Pour les transmissions sans fil, le canal est partagé entre les nœuds voisins, par conséquent, sa disponibilité dépend de l'état du trafic, tout comme le délai. En raison de cette caractéristique, la prise en charge de la QoS [32] ne peut pas être faite par le nœud capteur lui-même, mais la coopération des nœuds dans la zone d'interférence est nécessaire. Pour ce faire, il faut une approche novatrice en matière de conception pour coordonner la communication entre les nœuds voisins afin de soutenir la QoS[32] dans les RCSF. De plus, l'organisation distribuée apporte des défis supplémentaires à la collaboration pour soutenir la QoS[46].

Compte tenu de ces objectifs, on cite les considérations de conception de base d'un protocole de routage prenant en compte la qualité de service :

Réservation des ressources: les ressources de bande passante sont partagées par les capteurs voisins dans les RCSF. Par conséquent, une autre question difficile est de savoir comment allouer cette ressource partagée et quel type de système de réservation de ressources devrait être utilisé pour mettre en place et maintenir l'itinéraire conscient de la qualité de service.

L'estimation de la bande passante: pour offrir une route à bande passante garantie, l'idée clé est d'obtenir des informations sur la bande passante disponible pour un nœud qui représente une valeur dynamique affectée par le trafic de ses nœuds voisins. Par conséquent, les deux principaux problèmes de l'estimation de la largeur de bande sont la façon exacte d'estimer la largeur de bande disponible et la fréquence à laquelle les estimations doivent être effectuées. En outre, le compromis entre l'avantage de l'estimation de la largeur de bande et le coût en termes de surcharge de paquets et de ressources informatiques utilisées pour la largeur de bande est une autre question clé.

Découverte de routes : pour le routage prenant en compte la qualité de service, un autre problème est de déterminer quelle combinaison de latence et de surcharge réduites est la meilleure pour supporter la QoS[46].

Maintenance des routes: l'intégration d'un plan de maintenance rapide des routes dans un routage prenant en compte la qualité de service est une considération majeure de la conception. L'approche typique de la maintenance des routes, qui consiste à attendre que le nœud découvre une rupture de route, affecte considérablement la performance du routage. Par conséquent, un certain schéma de prédiction ou un routage redondant est nécessaire pour aider à l'entretien des routes.

Sélection de routes : le routage tenant compte de la qualité de service a des exigences plus strictes en matière de stabilité de route, car les défaillances fréquentes de route auront un impact négatif sur la qualité de service de bout en bout. Ainsi, dans un certain sens, la route ayant la plus grande largeur de bande disponible n'est pas la seule considération, la fiabilité de la route doit également être prise en compte lors du choix d'une route appropriée pour un protocole de routage prenant en compte la qualité de service.

Afin de prendre en charge la qualité de service dans les RCSF, le réseau doit garantir un ensemble de paramètres mesurables, tels que le délai, la variance du délai (gigue), la largeur de bande, le taux de livraison des paquets, etc.. Cependant, la nécessité de partager les ressources des canaux, l'organisation distribuée du réseau et la topologie dynamique de quelques RCSF représentent des défis au routage avec qualité de service.

1.4.2.5 Routage basé sur la cohérence

Dans les RCSF, le processus de traitement des données collectées est l'étape la plus importante de la phase du routage. Il existe deux types de techniques : le routage cohérent et le routage non cohérent basé sur le traitement des données. Dans ce dernier, tous les nœuds de l'arborescence collectent les données et les traitent avant de les envoyer au nœud le plus proche pour les analyser davantage, ces nœuds sont appelés des agrégateurs. Quant au routage cohérent, les données sont transmises aux agrégateurs après un traitement minimal comprenant des fonctions simples comme la suppression des doublons, Cette technique est économe en énergie puisque tout le traitement est effectué par les nœuds, ce qui réduit le temps total de traitement et la consommation d'énergie.

1.4.3 Autres classifications des protocoles de routages des RCSF

Les protocoles sont en outre classés comme proactifs, réactifs et hybrides, selon le type de routes établies dans le réseau pour la transmission des données de la source au puits. Dans les protocoles de routage proactifs, toutes les routes sont calculées avant que le puits n'initie la communication avec les nœuds du réseau, alors que dans les protocoles de routage réactifs, les routes ne sont calculées que sur demande.

Les protocoles de routage hybrides, comme leur nom l'indique, sont une combinaison des deux classes de protocoles proactifs et réactifs, qui décident s'il faut calculer le chemin de la source à la destination, selon le type de communication. En général, il est suggéré que les protocoles de routage par table (proactifs) sont meilleurs quand on considère les nœuds comme statiques. La raison en est qu'il est possible d'économiser beaucoup d'énergie par rapport aux protocoles de routage réactifs qui dépendent de l'algorithme découverte du meilleur chemin pour la transmission de données.

Une autre stratégie de routage efficace sur le plan énergétique que l'on trouve dans les protocoles de routage RCSF consiste à utiliser les connaissances sur la position spatiale des nœuds de capteurs pour interroger le réseau d'une manière localisée. Si le déploiement des nœuds de capteurs est connu, les requêtes de données peuvent être dirigées vers la zone d'intérêt, ce qui réduit la surcharge des transmissions sur l'ensemble du réseau.

1.5 La couche MAC

La couche MAC (Medium Access Control) [10] est responsable de la régulation de l'accès au canal partagé. Le principal enjeu associé à cette couche est de réduire les conflits entre les différents nœuds du réseau et de maintenir la capacité du réseau à un niveau raisonnable et de la détection des collisions. Dans les réseaux de capteurs sans fil, l'efficacité énergétique est la principale contrainte, pendant la communication, différents nœuds envoient les données au même endroit (au puits ou à la station de base), ce qui peut entraîner des collisions et consommer plus d'énergie pour la retransmission. Un protocole MAC bien conçu permettra aux nœuds d'accéder au canal de manière à économiser de l'énergie et à assurer la qualité du service.

Les protocoles MAC sont de deux sortes: basés sur la contention et sans contention. Dans le premier type, le protocole permet à multiples nœuds d'accéder au canal unique d'où chaque nœud doit écouter le médium avant d'envoyer les données. Les collisions peuvent être fréquentes, et la retransmission est requise. En revanche, dans les protocoles sans contention, le canal est divisé en tranches de temps (slots), chaque nœud utilise son intervalle de temps pour envoyer ses données ce qui offre une protection contre les collisions lors des communications.

La conception de protocoles MAC efficaces reste un sujet de recherche ouvert dans le domaine des RCSF. Les protocoles d'accès au support programmé, tels que ceux qui nécessitent une synchronisation temporelle globale (ex. TDMA) [47] ou ceux qui nécessitent la pré-distribution des codes (ex. CDMA)[48], nécessitent un soutien considérable en matière d'infrastructure ou une connaissance globale de l'état de l'ensemble du réseau, ce qui n'est pas possible dans le cas d'un réseau RCSF. Ainsi, les protocoles MAC de type CSMA[49], comme IEEE 802.11[9], sont mieux adaptés pour supporter la QoS. Il est souhaitable de réduire les collisions entre les paquets de contrôle et les paquets de données, ce qui est un problème inhérent à la norme IEEE 802.11[9] car ces paquets de données sont transmis par le même canal et sont donc en concurrence pour la transmission.

Dans cette partie, nous discutons des protocoles MAC conçus pour les RCSF, nous étudions les protocoles MAC existants et nous introduisons les standards les plus pratiques et prometteurs.

Les protocoles MAC sont classés en trois catégories en fonction du mécanisme d'accès au médium: par planification, la contention et le mécanisme d'accès hybride.

1.5.1 Protocoles MAC basés sur la programmation

Dans les protocoles MAC basés sur la planification, les nœuds se réveillent et écoutent seulement le canal dans les créneaux assignés, puis se mettent en veille dans les autres créneaux. Cette approche nécessite la connaissance de la topologie du réseau pour établir un planning permettant à chaque nœud d'accéder au support et communiquer avec d'autres nœuds sans avoir d'interférence avec d'autres transmissions.

Les ressources du canal peuvent être visualisées, à cette fin, d'un point de vue temps, fréquence ou temps-fréquence. Par conséquent, le canal peut être divisé en donnant toute la gamme de fréquences (largeur de bande) à un seul utilisateur pendant une fraction du temps comme c'est le cas en TDMA

ou en donnant une fraction de la gamme de fréquences à chaque utilisateur tout le temps comme c'est le cas en accès multiple par répartition en fréquence (FDMA), ou en fournissant à chaque utilisateur une portion de la largeur de bande pendant une fraction du temps comme dans les systèmes à spectre étalé, par exemple en accès multiple par répartition en code (CDMA). On note que de nombreux protocoles MAC basés sur la planification combinent TDMA et FDMA où différents créneaux horaires et canaux de fréquence peuvent être utilisés par différents nœuds.

Les parties suivantes décrivent les schémas d'accès multiples utilisés dans les RCSF :

TDMA (accès multiple à répartition dans le temps): le but de l'accès multiple par répartition dans le temps est de donner un intervalle de temps aux nœuds afin qu'ils puissent accéder au canal sans collision. Dans les RCSF, différents nœuds communiquent avec une station de base ou un puits[47]. En utilisant le schéma TDMA, des plages horaires personnelles sont attribuées aux nœuds afin que chacun de ces derniers puisse envoyer ses données pendant son propre créneau et que les nœuds inactifs puissent se mettre en veille pour économiser de l'énergie. Dans ce cas, les nœuds peuvent utiliser toute la bande passante. Dans ce schéma, la synchronisation est nécessaire pour éviter les collisions.

FDMA (accès multiple par répartition en fréquence): dans le schéma TDMA, chaque nœud doit être en mode actif pour recevoir le paquet de synchronisation et peut avoir un délai de communication supplémentaire causé par l'accès basé sur le temps. Le schéma FDMA évite ce problème en divisant la bande passante en plusieurs canaux afin que chaque nœud puisse avoir son propre canal pour envoyer les données sans délai. Dans le FDMA, les nœuds échangent leurs plannings afin d'être synchronisés[50].

CDMA (accès multiple par répartition en code): c'est une technique dans laquelle différents nœuds utilisent différents codes pour l'envoi du paquet et qui assure la transmission simultanée avec de légères interférences. Elle surmonte l'inconvénient du délai de communication en TDMA et de la bande passante limitée en FDMA puisqu'elle fournit la totalité de la bande passante aux nœuds[48].

Les protocoles MAC basés sur la programmation sont attrayants car une fois le planning établi, il n'y a pas de collisions, pas de sur-audition et l'écoute en veille est minimisée. De plus, ces protocoles offrent une latence limitée, une équité et un bon débit dans des conditions de trafic très chargées par rapport au MAC basé sur les contentions. On remarque que le trafic périodique et le trafic à forte charge sont les scénarios les plus appropriés pour les protocoles MAC basés sur la programmation, cependant, ces protocoles génèrent les problèmes ou les questions discutés comme suit[51] :

Complexité: l'absence d'un point d'accès central engendre des problèmes liés à la complexité élevée et au coût élevé des algorithmes d'attribution des créneaux horaires. Bien que l'ordonnancement TDMA distribué fonctionne bien pour les réseaux de taille moyenne, déterminer un calendrier sans collision devient rapidement impossible pour les grands réseaux et cela affecte clairement la modularité des services.

Flexibilité réduite: lorsque le modèle de trafic ou la topologie du réseau change, le calendrier global ou local doit être mis à jour. Par conséquent, les protocoles MAC planifiés peuvent ne pas être en mesure de s'adapter aux topologies hautement dynamiques qui se produisent dans les environnements mobiles car ils peuvent nécessiter trop de surcharge de communication ou un délai

de mise à jour trop long. Plus précisément, les utilisateurs inactifs de protocoles basés sur un calendrier consomment une partie des ressources du canal. Cette partie devient importante lorsque le nombre d'utilisateurs potentiels dans le système est très élevé au point qu'il n'est pas possible de mettre en place des systèmes sans conflit. De plus, l'adaptation de l'attribution des créneaux horaires n'est pas aisée dans un environnement décentralisé.

Surcharge du réseau : en général, les protocoles MAC basés sur la programmation nécessitent une synchronisation temporelle globale ou locale non seulement pendant la phase initiale de configuration du réseau mais aussi pendant l'exécution du réseau pour éliminer le décalage-horaire. En outre, pour accroître la flexibilité des changements de topologie du réseau, il peut être nécessaire de surcharger le réseau.

1.5.2 Protocoles MAC basés sur la contention

Les protocoles MAC basés sur la contention diffèrent en principe des approches basées sur la programmation car il n'y a pas de planificateur centralisé, donc, il n'y a aucune garantie de réussite pour la transmission de paquets. La question clé des différents protocoles basés sur la contention est de savoir comment résoudre les conflits une fois qu'ils se produisent afin que tous les messages soient transmis avec succès. En général, les nœuds se font concurrence pour l'utilisation du support sans fil et seul le vainqueur est autorisé à accéder au canal et à le transmettre.

L'un des points forts les plus importants des protocoles MAC basés sur la contention est la simplicité relative de ce mécanisme par rapport aux protocoles basés sur la programmation, car il ne nécessite ni synchronisation globale ni connaissance de la topologie. De plus, les utilisateurs inactifs des protocoles MAC basés sur la contention ne transmettent pas et ne consomment donc aucune partie des ressources du canal par rapport aux utilisateurs inactifs des protocoles basés sur la programmation. Le CSMA [52] est un schéma représentatif d'approches fondées sur la contention. Un nœud ayant un paquet pour transmettre détecte d'abord le canal avant de transmettre réellement. Si le nœud trouve le canal libre, il commence à émettre. Sinon, il reporte sa transmission pour éviter d'interférer avec la transmission en cours. Le CSMA ne s'appuie pas sur une entité centrale et est robuste à la mobilité des nœuds, ce qui en fait intuitivement un bon candidat pour les réseaux avec mobilité et dynamisme. Cependant, les protocoles MAC traditionnels basés sur la contention ne sont pas directement applicables à la plupart des applications des RCSF en raison de leur faible efficacité énergétique.

L'une des techniques prometteuses pour économiser l'énergie est l'échantillonnage en préambule, où chaque nœud choisit son calendrier actif indépendamment des autres nœuds voisins. Dans les techniques d'échantillonnage en préambule, chaque nœud ne se réveille que pour une courte durée pour vérifier s'il y a une transmission sur le canal ou non. De cette façon, chaque nœud dépense le plus de temps en mode veille.

Pour éviter la surdité, chaque trame de données est précédée d'un préambule suffisamment long pour s'assurer que tous les récepteurs potentiels détectent le préambule et obtiennent ensuite la trame de données. Selon le paramètre du cycle de service, les nœuds allument périodiquement leurs radios pour échantillonner le canal. Si un nœud constate que le canal est inactif, il se remet immédiatement en veille. Cependant, s'il détecte une transmission en préambule sur le canal, il garde sa radio allumée jusqu'à ce qu'il reçoive la trame de données suivante. Juste après la réception de la trame de données, le nœud envoie une trame ACK, si nécessaire, et se remet en veille. Pour être efficace, la durée de la transmission du préambule doit être au moins aussi longue que l'intervalle de contrôle défini comme la période entre deux instants consécutifs de réveil des nœuds.

De cette façon, un nœud s'assure que tous les récepteurs potentiels sont éveillés pendant la transmission du préambule afin qu'ils reçoivent l'information. Ceci est très bénéfique pour les applications où la charge de trafic du réseau est très faible, comme dans les applications de surveillance.

Malgré le succès de leur utilisation, les protocoles MAC basés sur la contention posent des problèmes majeurs :

Charge de trafic élevée: les protocoles MAC basés sur la contention dégradent considérablement le débit lorsque la charge de trafic augmente en raison de la forte contention par rapport à ceux basés sur la programmation. On note que leur nature distribuée les empêche d'atteindre la même efficacité que les protocoles basés sur les réservations. En particulier, les collisions deviennent des problèmes plus critiques pour le protocole d'échantillonnage du préambule à mesure que l'intervalle de contrôle et la charge de trafic augmentent. Étant donné que les modèles de trafic de nombreuses applications de RSCF sont corrélés, il s'agit là de la question critique du protocole d'échantillonnage du préambule, même si la charge de trafic moyenne est faible dans certains scénarios d'application. Le coût élevé de la transmission contrebalance l'efficacité énergétique dans les situations où le taux de collision est élevé.

Cycle de service limité: réduire le cycle de service implique de mettre les nœuds en veille pour des périodes plus longues, ce qui signifie que l'intervalle de contrôle doit être prolongé. Bien que l'utilisation d'un intervalle de contrôle plus long réduit le coût de l'écoute au ralenti sur le récepteur, elle augmente le coût de transmission car l'émetteur utilise un préambule plus long. Il y a donc un compromis à trouver entre le coût de réception d'une écoute au ralenti et le coût d'une transmission d'un préambule plus long. Il y a une valeur optimale pour le contrôle intervalle au-delà duquel les nœuds gaspillent plus d'énergie en transmission qu'ils n'en économisent à la réception. La recherche de l'intervalle de contrôle optimal dépend de plusieurs paramètres comme la puissance d'émission, la puissance de réception, la charge de trafic et la commutation de la puce radio. Par conséquent, les protocoles d'échantillonnage du préambule ont une portée limitée et un cycle de service déterminé par la valeur optimale de l'intervalle de contrôle.

Paramètre optimal : comme nous l'avons vu pour les cas de charge de trafic élevée et de cycle de service limité, la détermination des paramètres optimaux de l'intervalle de contrôle n'est pas triviale puisqu'elle est également fonction de la charge de trafic, de la topologie du réseau et des spécifications matérielles. L'intervalle de contrôle doit tenir compte de la charge de trafic du réseau, sinon la fiabilité et le débit se dégradent considérablement en raison de la forte contention lorsque l'intervalle de contrôle est expiré. On note que plus l'intervalle de contrôle augmente, plus le délai des paquets augmente, d'où la nécessité de trouver un compromis entre la consommation d'énergie, le débit et le délai du réseau.

1.5.3 Protocoles MAC hybrides

Les protocoles MAC hybrides combinent les avantages d'un accès aléatoire avec MAC basé sur la contention et d'un accès déterministe avec MAC basé sur la programmation [53]. L'idée d'un protocole MAC hybride n'est pas nouvelle, l'une des extensions consiste à utiliser un système de réservation avec contention, où les utilisateurs se disputent pendant une période de réservation, et ceux qui réussissent dans cette contention transmettent sans subir d'interférence. Un tel régime tire son efficacité du fait que les périodes de réservation sont de plusieurs ordres de plus courte que les

périodes de transmission. La motivation derrière les protocoles MAC hybrides pour les RCSF est d'offrir une QoS[32] flexible à plusieurs classes d'applications plutôt que de simplement maximiser le débit du réseau. Les protocoles MAC hybrides sont classés en deux catégories en fonction de la façon de combiner les protocoles MAC basés sur la contention et ceux basés sur la programmation: réservation pour la contention et mécanisme d'accès aux partitions. Dans le protocole MAC de réservation, les nœuds définissent les périodes communes d'activité et de veille, les périodes actives sont utilisées pour la communication et les périodes de sommeil pour économiser l'énergie. Cette approche exige que les nœuds maintiennent un certain niveau de synchronisation pour maintenir les périodes d'activité et de sommeil communes à tous les nœuds, comme c'est le cas pour le protocole MAC basé sur la programmation. Pendant les périodes actives, les nœuds se disputent le canal à l'aide d'approches basées sur la contention similaires au protocole MAC basé sur la contention. Par conséquent, le protocole MAC basé sur la contention est situé à l'intérieur de celui basé sur la programmation. Cependant, l'utilisation de périodes activité/sommeil communes peut ne pas convenir aux applications avec un trafic régulier ou une charge de trafic élevée. On note que la taille de la période active et l'algorithme pour résoudre le litige au début de la période active sont des questions critiques pour améliorer la fiabilité et le débit du réseau.

Malgré ses avantages attrayants de combiner les avantages des protocoles MAC basés sur la contention et de ceux basés sur la programmation, les protocoles MAC basés sur l'hybridation posent certains problèmes qui sont analysés comme suit :

Paramètre optimal: pour déterminer la taille optimale des périodes actives, il faut tenir compte de l'arbitrage entre deux paramètres : l'écoute passive et les collisions. Les courtes périodes d'activité réduisent l'écoute au ralenti, mais elles augmentent la contention et donc les taux de collision. De longues périodes d'activité font le contraire, elles réduisent la contention au prix d'une écoute accrue de l'inactivité. Par conséquent, si la période active est fixe, le protocole est rigide, car les nœuds n'ont aucun moyen de modifier dynamiquement leur rapport cyclique pour répondre à des charges de trafic variables dans le temps ou non uniformes dans l'espace. On note que des charges de travail variables sont attendues dans de nombreuses applications de RCSF puisqu'elles sont intégrées dans les environnements physiques. Par exemple, les nœuds qui sont plus près d'un puits sont plus susceptibles de relayer plus de trafic que les nœuds frontaliers. La portion optimale entre le protocole MAC basé sur la contention et celui basé sur la programmation dépend également de nombreux paramètres tels que la charge de trafic, la topologie du réseau et les exigences des applications. Par conséquent, il est difficile de trouver l'allocation optimale des ressources pour les environnements dynamiques.

Le temps de mise en veille: les périodes de mise en veille sont essentielles pour économiser de l'énergie. Cependant, ils introduisent un délai supplémentaire de bout en bout appelé délai de sommeil. Ce délai augmente considérablement la latence de bout en bout dans les réseaux à sauts multiples, car les nœuds intermédiaires sur une route n'ont pas nécessairement un calendrier commun. Il y a donc un compromis à trouver entre le délai de mise en veille et les périodes actives optimales.

Moins de compréhension: comprendre la fiabilité, le délai et le débit est essentiel pour caractériser les limites fondamentales de ces protocoles et optimiser ses paramètres. Néanmoins, il n'existe pas encore de compréhension claire de la performance réalisable des protocoles MAC hybrides par rapport aux deux approches que nous avons résumées précédemment. Le principal défi de cette analyse est la coexistence du comportement stochastique des protocoles MAC basés sur la contention et du comportement déterministe des protocoles MAC basés sur la programmation. De

plus, l'analyse des effets mutuels de ces deux systèmes est l'étape fondamentale pour comprendre la performance des protocoles MAC hybrides.

1.5.3.1 La normalisation des protocoles pour les RCSF

De nombreux protocoles MAC et de routage ont été développés pour les RCSF. La plupart des produits les plus récents des RCSF utilisent des solutions réseaux basées sur des standards. La publication des normes de l'IEEE, de l'IETF (Internet Engineering Task Force) et de l'ISA (International Society of Automation) a fait sortir la technologie des laboratoires de recherche et a développé de nombreux produits commerciaux.

Les normes de réseau de capteurs sans fil ont été spécialement conçues pour prendre en compte les ressources limitées des nœuds. Il y a eu de nombreuses contributions aux protocoles normalisés pour les dispositifs à faible consommation tels que ZigBee[54], IETF 6LoWPAN, routage IETF[55] sur réseaux à faible consommation et réseaux déficitaires (ROLL)[56], WirelessHART[55], ISA SP-100 [56] et IEEE 802.11[9]. Dans ce qui suit, nous présentons ces en mettant en évidence leurs idées clés :

ZigBee[54]: la technologie ZigBee est adaptée à un grand nombre d'applications grâce à son évolutivité et son efficacité énergétique [57]. Par exemple, dans la domotique intelligente, le débit de données ZigBee et la portée radio sont suffisants pour la surveillance de la pièce. Néanmoins, dans un système de surveillance plus complexe, les réseaux de capteurs d'ambiance et les réseaux de capteurs corporels peuvent être intégrés ensemble et connectés à Internet via 6LoWPan.

802.11[9]: la famille de normes WLAN IEEE 802.11[9] est composée d'un certain nombre de spécifications qui définissent principalement les couches physiques et MAC du domaine des technologies WLAN, et elle a également été largement considérée dans le contexte des communications industrielles sans fil [51]. Semblable à d'autres normes de la série IEEE 802.x, le MAC IEEE 802.11 suggère le contrôle de liaison logique (LLC) IEEE 802.2 comme interface standard pour les couches supérieures. Étant donné que la norme IEEE 802.11[9] est une norme WLAN, ses principales intentions sont de fournir un débit élevé et une connexion réseau continue plutôt qu'une efficacité énergétique du réseau.

WirelessHART[55] : c'est une solution prometteuse pour le remplacement du protocole HART[56] câblé dans les contextes industriels. La consommation d'énergie n'est pas une préoccupation majeure dans WirelessHART[56], alors que la couche de liaison de données est basée sur TDMA, ce qui nécessite une synchronisation temporelle et des intervalles de temps préprogrammés à longueur fixe par un gestionnaire de réseau centralisé. Un tel gestionnaire devrait mettre à jour le calendrier fréquemment pour tenir compte des exigences de fiabilité et de délai et des changements dynamiques du réseau, ce qui exige des équipements matériels complexes, ce qui contraste avec la nécessité de protocoles simples capables de fonctionner avec une énergie et des ressources de traitement limitées.

ISA SP-100[56]: l'ISA SP-100 travaille actuellement sur l'élaboration d'une série de normes portant sur l'adoption des technologies sans fil dans différentes industries. La norme ISA-SP100.11a[56] s'applique aux applications de procédés non critiques qui peuvent tolérer des délais pouvant atteindre 100 ms. En s'appuyant sur la norme IEEE 802.15.4 [58], il hérite de certaines de ses propriétés : faibles débits (jusqu'à 250 kbit/s) et faible complexité de mise en œuvre pour les terminaux simples. En outre, une couche de liaison de données et une couche d'adaptation entre le

MAC et la couche de liaison de données sont introduites. La couche de liaison de données contrôle le saut de fréquence et ajoute un schéma TDMA. Nous remarquons que les deux normes visent des domaines d'application qui se chevauchent et qu'elles ont basées sur la même technologie sans fil sous-jacente.

ROLL: ROLL [56] se concentre sur les problèmes de routage pour les réseaux (LLNs) qui sont composés de nombreux dispositifs embarqués avec une puissance, une mémoire et des ressources de traitement limitées. Ils sont interconnectés par une variété de liens, tels que IEEE 802.15.4 [58], Bluetooth, WiFi à faible puissance, filaire ou autres liens de communication à faible puissance (PLC). Les LLNs sont en train de passer à une solution IP de bout en bout pour éviter le problème des réseaux non interopérables interconnectés par des passerelles de traduction de protocole et des proxies. Le groupe de travail se concentre sur les solutions de routage pour un sous-ensemble d'entre eux: les réseaux industriels, les réseaux de maisons connectées, les réseaux de bâtiments et de capteurs urbains pour lesquels des exigences de routage ont été spécifiées. Ces exigences de routage spécifiques à l'application seront utilisées pour la conception du protocole. Le cadre prendra en considération divers aspects, notamment une grande fiabilité en présence de caractéristiques de perte et de connectivité variant dans le temps, tout en permettant un fonctionnement à faible consommation avec une mémoire et une pression CPU très modestes dans des réseaux comprenant potentiellement une très faible consommation d'énergie et un grand nombre de nœuds.

Bien que des normes spécifiques aux applications émergent, elles peuvent encore être améliorées en ce qui concerne les exigences des applications. Par exemple, certaines études de recherche proposent d'optimiser des paramètres standard tels que la taille des paquets, la longueur des intervalles, la longueur des fenêtres de contention ou même d'introduire des protocoles alternatifs. De plus, le rendement des normes récentes (p. ex., MQTT, IEEE 802.15.6) doit faire l'objet d'une étude plus approfondie, car il y a un manque d'évaluation de ces solutions et de comparaison avec les protocoles bien établis. Il apparaît également que les normes actuelles ne peuvent pas répondre à tous les besoins des applications, notamment en ce qui concerne les exigences en temps réel et les exigences en temps réel.

Dans la section précédente, nous avons discuté de nombreux protocoles MAC et de routage existants pour les RCSF. En considérant le mécanisme d'économie d'énergie, nous observons le mécanisme explicite d'économie d'énergie des protocoles MAC et le mécanisme implicite d'économie d'énergie des protocoles de routage. Rappelons que la plupart des protocoles de routage se concentrent sur la façon de réduire la charge de trafic du réseau ou du chemin de routage plutôt que sur le mécanisme de veille explicite.

1.5.3.2 Conclusion

Les réseaux mobiles Ad hoc (MANET) ont attiré beaucoup d'attention au sein de la communauté des chercheurs ces dernières années, cela s'explique par les progrès récents de l'informatique mobile et de la technologie sans fil et par les applications potentielles qui pourraient être réalisées à l'aide de ces réseaux. Bien que les nœuds des MANET partagent bon nombre des propriétés de leurs homologues du réseau câblé traditionnel, ils présentent certains défis uniques découlant de la nature inhérente du support de communication sans fil, de la fonction distribuée de leur mécanisme d'accès au support et des fréquents changements topologiques associés à leur mobilité. Au cours

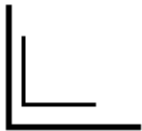
des dernières années, beaucoup d'efforts de recherche ont été consacrés à trouver des solutions à ces questions difficiles.

Dans cette partie nous avons cité les caractéristiques des MANET et leur conception selon le modèle de référence OSI en se concentrant plus particulièrement sur les couches physiques, de liaison de données, réseau et transport. Le chapitre a également passé en revue les diverses classes de protocoles de routage qui ont été proposés pour ces réseaux. Comprendre les limites fondamentales des différents protocoles est une question importante pour les concepteurs de protocoles des différentes couches, et l'exploitation minutieuse des différentes interactions de couches permet d'améliorer les performances du réseau et, par conséquent, les performances des applications.

Un grand nombre de protocoles MAC et de protocoles de routage existent et seront développés, par conséquent, la question importante à laquelle il faut répondre est de savoir quelles combinaisons de protocoles donnent de bonnes performances pour les applications et quels paramètres doivent être partagés et optimisés entre les différentes couches pour améliorer les performances[49]. En considérant notre classification des protocoles, il est naturel que le protocole MAC basé sur la contention supporte les protocoles de routage basés sur la topologie et centrés sur les données et certains des protocoles de routage basés sur la localisation. Cependant, il n'est pas clair comment on peut combiner d'autres protocoles MAC avec les protocoles de routage sous d'autres catégories différentes. L'une des principales raisons est que de nombreux d'entre eux couvrent plus que les fonctionnalités de base de leur couche et que la plupart des protocoles MAC des RSCF basés sur la programmation prennent en charge le mécanisme de transfert de paquets.

Chapitre II : La consommation d'énergie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)

Ce deuxième chapitre met en évidence les différents mécanismes et techniques d'efficacité énergétique dans les RCSF



2 Chapitre 2 : La consommation d'énergie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)

2.1 Introduction

La minimisation de l'énergie consommée dans les RCSF représente un grand défi pour maximiser la durée de vie du réseau. Dans ce cadre, de nombreux travaux de recherche ont été menés afin de proposer un large éventail de solutions au problème d'économie d'énergie couvrant plusieurs domaines allant de l'optimisation de la couche physique aux solutions de couche réseau. Par conséquent, il n'est pas facile pour le concepteur de RCSF de choisir les solutions efficaces qui devraient être considérées dans la conception de l'architecture RCSF spécifique à l'application.

Ce chapitre se concentre sur les différentes techniques permettant de réduire la consommation d'énergie des nœuds capteurs, nous définissons d'abord la notion de durée de vie du réseau puis nous identifions les raisons du gaspillage d'énergie dans les RCSF et classons les techniques d'efficacité énergétique en cinq classes, à savoir : la réduction des données, la réduction du contrôle, le routage efficace en énergie, le cycle de fonctionnement et le contrôle topologique. Nous détaillons ensuite chacune d'entre elles et citons de nombreux exemples.

2.2 Définition de la durée de vie du réseau et de l'efficacité énergétique

Il existe plusieurs définitions de la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil, selon que l'on considère le nombre de nœuds vivants, la couverture de la zone d'intérêt, la connectivité entre nœuds ou la qualité de service de l'application[59]. En conséquence, nous donnons une définition générale de la durée de vie d'un RCSF comme le temps écoulé jusqu'à ce qu'une certaine condition dans le réseau soit vérifiée. Des exemples de telles conditions sont : "le premier/dernier capteur défectueux", "un pourcentage donné de capteurs ne peut pas atteindre le puits", "le taux de transmission des données / couverture basculant en dessous d'un seuil prédéfini". Par conséquent, la durée de vie d'un réseau de capteurs est liée à une mesure de temps, mais ne permet pas toujours de caractériser d'autres dimensions du réseau, telles que la latence ou les propriétés de tolérance aux pannes.

L'efficacité énergétique a d'abord été définie comme le rapport entre la quantité totale de données fournies et l'énergie totale consommée. Par conséquent, plus les données sont transmises avec succès pour une quantité donnée de consommation d'énergie, plus l'efficacité énergétique de la solution augmente. Une définition plus large, couvrant la précédente, a alors été proposée: l'efficacité énergétique peut être définie comme "l'utilisation de moins d'énergie pour fournir le même service". Dans ce contexte, un système qui fournit une plus grande précision de détection d'événements pour la même quantité d'énergie peut être considérée comme efficace en énergie. En conséquence, l'efficacité énergétique est généralement identifiée comme un compromis satisfaisant entre de multiples critères d'optimisation (comme la consommation d'énergie, le temps de latence

et le taux de livraison des données), où l'évaluation de la notion de "satisfaction" est laissée à la discrétion du concepteur. Comme nous le verrons dans ce qui suit, la maximisation de la durée de vie du réseau n'a de sens que si elle se fait dans un environnement efficace en énergie, c'est-à-dire économiser l'énergie des nœuds capteurs tout en maintenant le comportement souhaitable du réseau. Cependant, dans la littérature, il n'y a pas de consensus sur la définition de la durée de vie d'un réseau, la majorité des auteurs utilisent une définition adaptée au contexte de leur travail. Cette situation a conduit à une multitude de définitions existantes. Sur la base des travaux précédents sur les RCSF, nous donnons un aperçu des définitions les plus courantes de la durée de vie du réseau.

2.2.1 Durée de vie du réseau basée sur le nombre de nœuds vivants

La définition la plus fréquente dans la littérature est celle du temps pendant lequel tous les capteurs sont en vie. Les nœuds puits sont exclus de l'ensemble des nœuds pour refléter l'hypothèse selon laquelle ils sont des dispositifs plus sophistiqués et plus puissants. Cette durée de vie est facile à calculer car elle ne tient pas compte des changements de topologie, cependant, dans les réseaux denses où la redondance est présente, cette mesure ne représente pas réellement l'évaluation de la durée de vie. Par conséquent, le seul cas dans lequel cette mesure peut être raisonnablement utilisée est celui où tous les nœuds sont d'une importance égale et critique pour l'application réseau.

Une variante définit la durée de vie du réseau comme le temps qui s'écoule avant que la fraction de nœuds vivants ne tombe en dessous d'un seuil prédéfini. Bien que cette définition tienne compte de la redondance contrairement à la première, elle ne décrit pas avec précision le fonctionnement correct des applications de collecte de données où la défaillance d'au plus de 5% des capteurs près du nœud puits peut empêcher ce dernier de recevoir les données recueillies.

Dans le contexte du clustering, certains auteurs définissent la vie du réseau par le temps jusqu'à la défaillance du premier CH. Cependant, dans la plupart des travaux, les chercheurs changent dynamiquement le CH pour équilibrer la consommation d'énergie.

2.2.2 Durée de vie du réseau basée sur la couverture

La couverture reflète la capacité du réseau à détecter un événement dans la zone surveillée, c'est pourquoi certains travaux définissent la durée de vie comme le temps pendant lequel la zone d'intérêt est couverte par les nœuds capteurs. Toutefois, même une couverture de 100 % n'est pas suffisante lorsqu'elle ne garantit pas que les données recueillies soient transmises au nœud puits.

2.2.3 Durée de vie du réseau basée sur la connectivité

Cette définition est basée sur la capacité du réseau à transmettre des données à un puits et est similaire à celle qui a été proposée dans le contexte des réseaux Ad hoc, où la durée de vie du réseau est définie comme la durée minimale pendant laquelle le pourcentage de nœuds vivants ou la taille de la plus grande composante connectée du réseau chute sous un certain seuil.

2.2.4 Durée de vie du réseau en fonction des exigences de l'application

Certains auteurs considèrent que le réseau est vivant tant que les fonctionnalités applicatives sont assurées et que les exigences sont satisfaites[60][61]. Toutefois, si aucune connectivité n'est garantie pour rapporter l'événement, cette définition devient non pertinente.

En conclusion, la durée de vie du réseau doit tenir compte de la connectivité et de la couverture si l'application en a besoin. La connaissance des exigences de l'application permettra aux concepteurs du RCSF d'affiner la définition de la durée de vie du réseau, conduisant à une évaluation plus réaliste et plus pertinente pour les utilisateurs de l'application.

2.3 Les causes de perte d'énergie dans les RCSF

Dans la littérature, plusieurs raisons ont été invoquées pour expliquer le gaspillage d'énergie, nous détaillons dans cette section les causes d'un gaspillage d'énergie potentiel dans les RCSF, puis nous proposons par la suite une taxonomie des solutions existantes en matière d'efficacité énergétique en prenant en compte les contraintes en termes de ressources des capteurs.

Dans les RCSF, les capteurs dissipent de l'énergie pendant: la détection, le traitement et la transmission/réception des données pour remplir la mission requise par l'application. Le sous-système de détection est consacré à l'acquisition de données, de ce fait, il est évident que la minimisation des données générées permettra d'économiser l'énergie de capteurs très contraignants car la redondance inhérente aux RCSF produira d'énormes données similaires que le réseau va router vers le nœud puits. Les résultats expérimentaux confirment que le sous-système de communication est une source gourmande de dissipation de l'énergie.

En ce qui concerne la communication, il y a aussi un gaspillage d'énergie important dans des états qui sont inutiles du point de vue de l'application, tels que [62]:

- **Les collisions** : qui se produisent lorsqu'un nœud transmet et reçoit en même temps ou lorsque deux nœuds capteurs ou plus tentent de transmettre simultanément leurs données au même nœud de destination. En effet, les paquets entrent en collision les uns avec les autres et le nœud de destination ne peut recevoir aucun des deux correctement. Par conséquent, la retransmission est nécessaire, ce qui conduit à l'utilisation de plus d'énergie pour envoyer à nouveau les paquets. Les conflits secondaires se produisent lorsqu'un récepteur se trouve dans la portée d'émission de son émetteur et d'autres émetteurs simultanés au moment de la collision. Dans ce cas, le récepteur ne peut pas recevoir le bon paquet avec succès.

- **La sur-écoute (overhearing)** : lorsqu'un expéditeur transmet un paquet, tous les nœuds dans sa zone de transmission reçoivent ce paquet même s'ils ne sont pas la destination prévue. Ainsi, l'énergie est gaspillée lorsqu'un nœud reçoit des paquets destinés à d'autres nœuds.

- **La surcharge des paquets de contrôle** : un nombre minimal de paquets de contrôle doit être utilisé pour permettre les transmissions de données.

- **L'écoute passive** : définie comme étant l'une des principales sources de dissipation d'énergie, l'écoute passive se produit lorsqu'un nœud écoute un canal inactif afin de recevoir du trafic éventuel.

- **Les interférences** : chaque nœud situé entre la portée de transmission et la portée d'interférence reçoit un paquet mais ne peut le décoder.

Comme la durée de vie du réseau est devenue la caractéristique clé de l'évaluation des RCSF, plusieurs techniques visant à minimiser la consommation d'énergie et à améliorer la durée de vie du réseau ont été proposées. Nous présentons une taxonomie de ces techniques.

2.4 Les mécanismes et techniques d'efficacité énergétique dans les RCSF

La plupart des RCSF fonctionnent sur batteries, ce qui limite non seulement la durée de vie du capteur, mais ce qui rend aussi de la conception et de la gestion efficaces des RCSF un véritable défi. La limitation de l'approvisionnement énergétique, cependant, a inspiré une grande partie de la recherche sur les RCSF à tous les niveaux de la pile protocolaire. Diverses méthodes peuvent être adoptées pour réduire la consommation d'énergie, telles que le réglage de la puissance du récepteur et la mise en mode veille des nœuds capteurs.

Un réseau est souvent évalué en fonction de la qualité de ses paramètres de service, tels que le délai, le débit, la gigue, la disponibilité, la fiabilité et même la sécurité. Cependant, lorsqu'il s'agit de la consommation d'énergie, on rencontre souvent des difficultés, car l'évaluation et l'optimisation du réseau en tant que modèle global qui prend en compte la consommation d'énergie n'existe guère.

En général, les chercheurs se concentrent sur l'architecture de réseau traditionnelle et essaient de minimiser un composant spécifique d'une couche unique, dans l'espoir que la consommation d'énergie globale du réseau soit réduite sans tenir compte des autres composants ou couches. Ce n'est pas une situation idéale, où l'on ne sait pas comment un seul composant s'intègre dans l'image énergétique globale d'un réseau complet de capteurs sans fil. La plupart des modèles actuels de minimisation de l'énergie se concentrent sur l'envoi et la réception de données, tandis que les autres paramètres sont négligés. Dans d'autres travaux, le modèle de consommation d'énergie s'est concentré sur le coût d'envoi et de réception des données et a déduit la limite supérieure de l'efficacité énergétique de la distance à saut unique. Cette approche considère un nœud intermédiaire entre la source et la destination afin que la retransmission permette d'économiser l'énergie. D'autres approches évaluent l'efficacité énergétique des réseaux de capteurs sans fil en utilisant le modèle de consommation d'énergie mentionné dans [63].

Nous pouvons identifier cinq grandes catégories de techniques efficaces sur le plan énergétique, à savoir la réduction des données, la réduction des surcharges des protocoles, le routage efficace en énergie, le duty cycling et le contrôle de la topologie[64] :

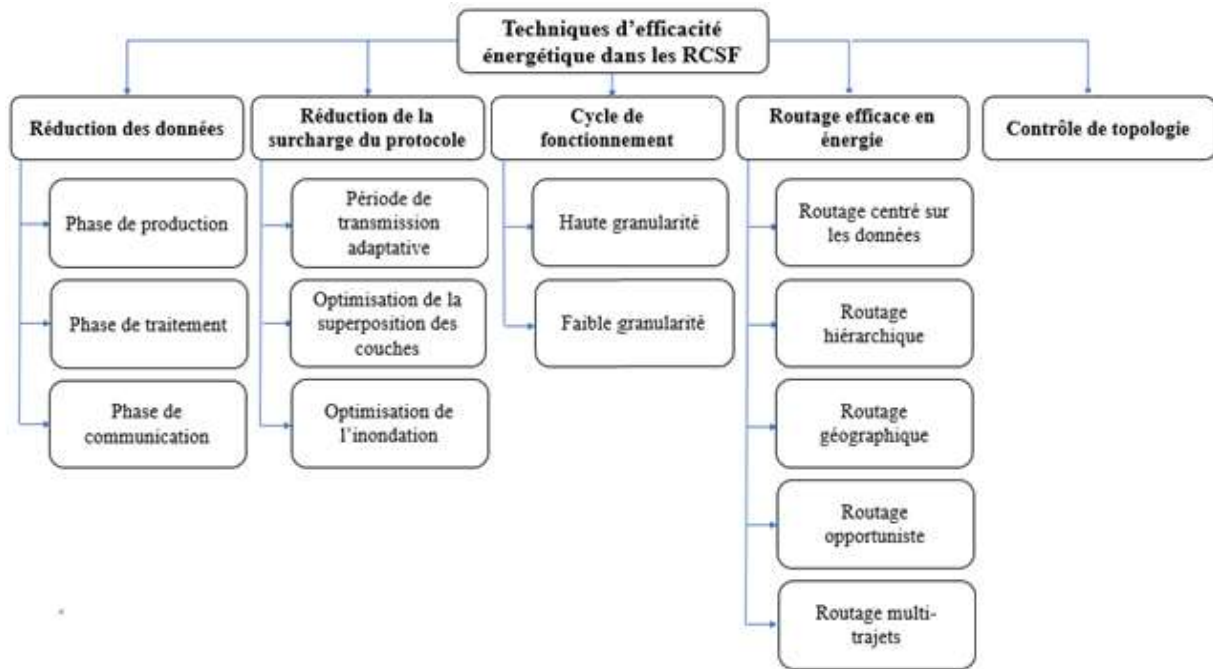


Figure 13: Techniques d'efficacité énergétique dans les RCSF

2.4.1 La réduction des données produites

La réduction de données se concentre sur la réduction de la quantité de données produites, traitées et transmises[64]. Dans l'étape de production, des techniques basées sur l'échantillonnage et la prédiction sont proposées, les premières exploitent la corrélation spatio-temporelle entre les échantillons pour dynamiser le taux de collecte des données, et les dernières, compte tenu de l'historique des lectures passées et de l'observation que les capteurs sont capables d'effectuer des calculs locaux, prédisent l'ensemble des lectures, ce qui permet de désactiver le dispositif de détection. Dans l'étape de traitement et de communication, différentes opérations sur les données collectées ont été introduites pour faire face à la pénurie des ressources énergétiques dans un RCSF comme la compression de données et l'agrégation de données. Pour cette dernière, on peut distinguer aussi la technique de clustering, la topologie en arbre et les solutions sans structure.

2.4.2 La réduction de la surcharge du protocole

L'objectif de cette technique est d'augmenter l'efficacité du protocole en réduisant la surcharge. Différentes techniques existent comme l'adaptation des périodes de transmission en fonction de la stabilité du RCSF ou de la distance à la source d'information. En effet, les protocoles de routage recourent souvent à des échanges de messages périodiques qui représentent des sources de surcharge dans les RCSF. Une autre technique est le croisement avec les couches supérieure et inférieure afin d'optimiser les sources d'approvisionnement du réseau tout en répondant aux exigences de l'application et optimisation des inondations pour éviter les retransmissions inutiles. En effet, l'inondation est une technique largement utilisée dans les RCSF pour la découverte de la

localisation, l'établissement d'itinéraires, le requêtage, etc. Cependant, elle reste une opération très coûteuse pour les capteurs alimentés par batterie.

2.4.3 Le routage efficace en énergie

Les protocoles de routage doivent être conçus de manière à maximiser la durée de vie du réseau en minimisant l'énergie consommée par la transmission de bout en bout et en évitant les nœuds à faible énergie résiduelle. Certains protocoles sont opportunistes, tirant parti de la mobilité des nœuds ou de la nature radiodiffusée des communications sans fil pour réduire l'énergie consommée par une transmission au puits. D'autres utilisent les coordonnées géographiques des nœuds pour construire les routes vers la destination. D'autres construisent une hiérarchie de nœuds pour simplifier le routage et réduire sa surcharge. Les protocoles de routage par trajets multiples utilisent plusieurs routes pour obtenir l'équilibrage de charge et la robustesse face aux défaillances des routes. Enfin, les protocoles centrés sur les données n'envoient les données qu'aux nœuds intéressés afin d'éviter les transmissions inutiles.

2.4.4 Le duty cycling (ou cycle de fonctionnement)

Les techniques de cycle de service sont aussi appelées techniques de planification de l'activité des nœuds, ils permettent aux nœuds d'alterner les périodes d'activité et de veille. En effet, seul l'état de veille garantit une économie d'énergie puisque l'émission, la réception et l'écoute au repos consomment la ressource rare et coûteuse de la batterie. L'idée est alors de mettre hors tension le sous-système radio chaque fois que cela est possible tout en assurant un réseau opérationnel du point de vue applicatif, ceci suggère que les fractions de temps pendant lesquelles les nœuds se mettent en mode veille ou en mode actif doivent être coordonnées et adaptées aux exigences spécifiques des applications. Ses techniques peuvent être subdivisées en techniques de haute granularité ou de faible granularité et sont étroitement liées au protocole d'accès au support [65] :

Haute granularité: généralement, un grand nombre de capteurs est déployé sur la zone surveillée. Cette haute densité entraîne une grande redondance, par conséquent, les nœuds redondants doivent être désactivés pour atteindre un niveau élevé d'économie d'énergie tout en conservant un nombre réduit de nœuds en mode actif pour répondre aux exigences des applications.

Faible granularité: ce niveau traite l'activité d'ordonnement des nœuds qui ont été sélectionnés comme actifs pour assurer la fonctionnalité du réseau. Même ces nœuds peuvent se mettre en veille lorsqu'ils n'ont aucun message à envoyer ou à recevoir. Par conséquent, la planification de l'activité des nœuds doit être coordonnée avec l'accès au medium.

2.4.5 Contrôle de la topologie

Il se concentre sur la réduction de la consommation d'énergie en ajustant la puissance de transmission tout en maintenant la connectivité du réseau, une nouvelle topologie réduite est créée à partir des informations locales.

2.5 Les approches de réduction de la consommation d'énergie dans les RCSF

Dans cette section, nous passons en revue les principales approches existantes proposées pour résoudre le problème de la consommation d'énergie des capteurs alimentés par batterie[42].

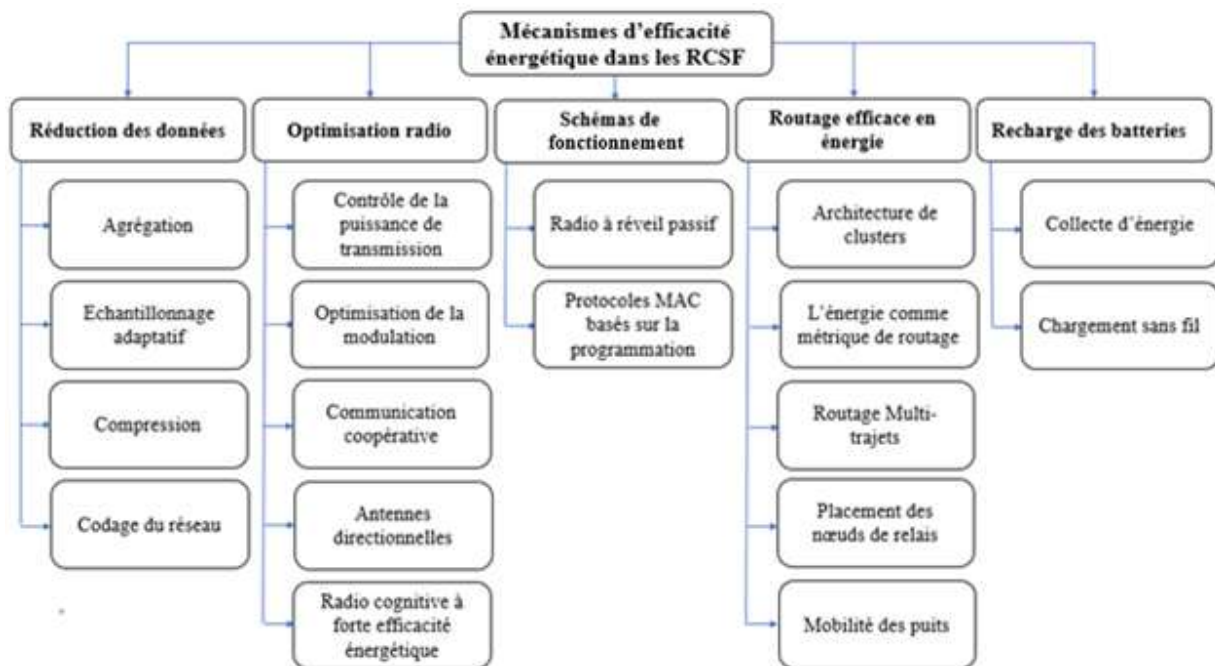


Figure 14: Classification des mécanismes d'efficacité énergétique dans les RCSF[42]

2.5.1 La réduction des données envoyées

C'est un mécanisme qui vise à réduire la quantité de données à envoyer au puits. Deux méthodes peuvent être adoptées conjointement : la limitation des échantillons inutiles et la limitation des tâches de détection car la transmission et l'acquisition des données sont coûteuses en termes d'énergie. Plusieurs techniques peuvent être appliquées :

L'agrégation : dans les schémas d'agrégation de données, les nœuds situés le long d'une route vers le puits fusionnent les données pour réduire la quantité de données qui leur sont transmises. Par exemple, un nœud ne peut retransmettre que la moyenne ou le minimum des données reçues. De plus, l'agrégation des données peut réduire la latence puisqu'elle réduit le trafic, améliorant ainsi les délais. Toutefois, les techniques d'agrégation des données peuvent réduire l'exactitude des données recueillies. En effet, selon la fonction d'agrégation, les données d'origine peuvent ne pas être récupérées par le puits, ce qui peut entraîner une perte de précision des informations. Les techniques d'agrégation de données dédiées aux réseaux de capteurs sans fil sont étudiées en détail par [66] et par [67].

Échantillonnage adaptatif : la tâche de détection est consommatrice d'énergie et peut générer des échantillons inutiles, ce qui affecte les ressources de communication et les coûts de traitement. Les

techniques d'échantillonnage adaptatives ajustent le taux d'échantillonnage à chaque capteur tout en s'assurant que les besoins de l'application sont satisfaits en termes de couverture ou de précision de l'information. Par exemple, dans une application de supervision, des détecteurs acoustiques de faible puissance peuvent être utilisés pour détecter une intrusion. Ensuite, lorsqu'un événement est signalé, les caméras gourmandes en énergie peuvent être mises sous tension pour obtenir des informations à granularité plus fine. La corrélation spatiale peut être utilisée pour diminuer le taux d'échantillonnage dans les régions où les variations dans les données détectées sont faibles. Dans les applications de reconnaissance de l'activité humaine, les auteurs dans [68] proposent d'ajuster la fréquence d'acquisition à l'activité de l'utilisateur parce qu'il n'est pas nécessaire d'échantillonner à la même fréquence lorsque l'utilisateur est assis ou en train de courir.

Le codage réseau (NC) : il peut être utilisé pour réduire le trafic dans les scénarios de diffusion en envoyant une combinaison linéaire de plusieurs paquets au lieu d'une copie de chaque paquet. Pour illustrer le codage du réseau, la (Figure 15) montre une topologie à cinq nœuds dans laquelle le nœud 1 doit diffuser deux éléments de données (a et b). Si les nœuds stockent et transfèrent simplement les paquets qu'ils reçoivent, cela génère six transmissions par paquets (2 pour chaque nœud 1, 2 et 3 respectivement). Avec l'approche de codage du réseau, les nœuds 2 et 3 peuvent transmettre une combinaison linéaire des éléments de données (a et b), de sorte qu'ils n'auront à envoyer qu'un seul paquet. Les nœuds 4 et 5 peuvent décoder le paquet en résolvant des équations linéaires. Par conséquent, deux paquets sont enregistrés au total dans l'exemple. Le codage de réseau exploite le compromis entre le calcul et la communication puisque les communications sont lentes par rapport aux calculs et plus gourmandes en énergie. Les auteurs dans [69] combinent le codage réseau et les ensembles dominants connectés pour réduire davantage la consommation d'énergie dans les scénarios de radiodiffusion.

AdapCode [70] est un protocole de diffusion de données dans lequel un nœud envoie un message pour chaque N messages reçus, ce qui permet d'économiser une fraction de la bande passante jusqu'à $(N-1)/N$ par rapport à $(N-1)/N$, le nœud récepteur peut récupérer les paquets originaux par élimination gaussienne après avoir reçu N paquets codés avec succès. De plus, AdapCode améliore la fiabilité en adaptant N à la densité des nœuds, car lorsque N augmente et que la densité diminue, il devient plus difficile de récupérer suffisamment de paquets pour décoder les données. La fiabilité est encore améliorée en permettant aux nœuds recevant moins de N paquets d'envoyer un accusé de réception négatif à récupérer les données manquantes.

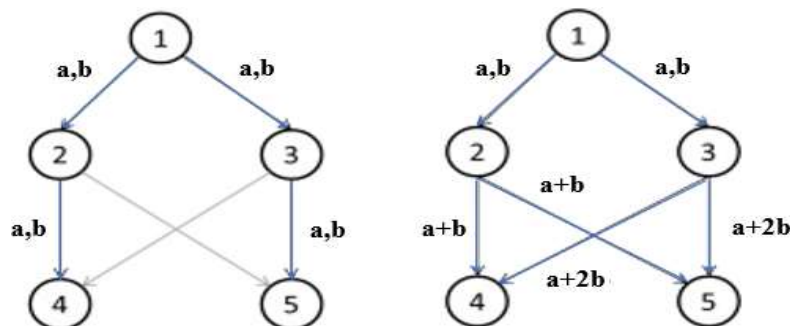


Figure 15: Exemple de codage réseau

La compression des données : cette technique code l'information de telle sorte que le nombre de bits nécessaire pour représenter le message initial est réduit assurant ainsi une efficacité sur le plan énergétique. Cependant, les algorithmes de compression existants ne sont pas applicables aux nœuds capteurs en raison de leurs ressources limitées. Par conséquent, des techniques spécifiques ont été développés pour s'adapter aux capacités de calcul et de puissance des capteurs sans fil, ces algorithmes de compression ont été étudié par [71].

2.5.2 L'optimisation radio

Le module radio est le composant principal qui provoque l'épuisement des batteries des nœuds capteurs. Pour réduire la dissipation d'énergie due aux communications sans fil, les chercheurs ont essayé d'optimiser les paramètres radio tels que les schémas de codage et de modulation, la transmission de puissance et la direction de l'antenne.

Le contrôle de la puissance d'émission (TPC) : cette technique a été étudiée pour améliorer l'efficacité énergétique de la couche physique en ajustant la puissance d'émission radio. Dans CTCA (Cooperative Topology Control with Adaptation) [72], les auteurs proposent d'ajuster régulièrement la puissance d'émission de chaque nœud afin de prendre en compte le profil de consommation énergétique inégal des capteurs. Par conséquent, un nœud ayant une énergie restante plus élevée peut augmenter sa puissance de transmission, ce qui permettra potentiellement à d'autres nœuds de diminuer leur puissance de transmission, économisant ainsi de l'énergie. Toutefois, la stratégie du contrôle de la puissance d'émission a un effet non seulement sur l'énergie, mais aussi sur les délais, la qualité des liaisons, les interférences et la connectivité. En effet, lorsque la puissance d'émission diminue, le risque d'interférence diminue également. Au contraire, le délai est potentiellement plus long, car il faudra plus de sauts pour acheminer un paquet. Enfin, la puissance d'émission influence la topologie du réseau parce que la connectivité potentielle entre les capteurs varie et favorise également la réutilisation spatiale de la bande passante si deux communications peuvent avoir lieu sans interférence.

L'optimisation de la modulation : elle vise à trouver les paramètres de modulation optimaux qui résultent en la consommation d'énergie minimale de la radio. Par exemple, l'épuisement de l'énergie est causé par la puissance absorbée du circuit et la puissance absorbée du signal transmis. Sur les courtes distances, la consommation du circuit est supérieure à la puissance d'émission, tandis que pour des distances plus longues, la consommation du circuit est supérieure à la puissance d'émission, la puissance du signal devient donc dominante. Les recherches existantes tentent de trouver un bon compromis entre la taille de la constellation (nombre de symboles utilisés), le débit d'information (nombre de bits d'information par symbole), le temps de transmission, la distance entre les nœuds et le bruit. Les auteurs dans [42] ont montré que la consommation d'énergie nécessaire pour répondre à un bit donné, le taux d'erreur (TEB) et le délai requis peuvent être réduits au minimum en optimisant la transmission. Dans [73], les auteurs ont étudié l'efficacité énergétique de trois schémas de modulation, le type de modulation et ses paramètres optimaux qui permettent d'obtenir des résultats minimaux de consommation d'énergie pour différentes distances entre les nœuds.

Les schémas coopératifs de communication : ils ont été proposés pour améliorer la qualité du signal reçu en exploitant plusieurs dispositifs à antenne unique qui collaborent pour créer un émetteur virtuel à plusieurs antennes. L'idée est d'exploiter le fait que les données sont généralement entendues par les nœuds voisins en raison de la nature de diffusion de la chaîne. Par conséquent, en impliquant ces nœuds dans la retransmission des données, il est possible de créer une diversité spatiale et de lutter contre l'évanouissement et l'ombrage par trajets multiples. Dans [74], les auteurs ont étudié comment la transmission coopérative peut être utilisée pour étendre la portée de communication et ainsi équilibrer le cycle de fonctionnement des nœuds puisque les capteurs relais normaux peuvent être remplacés par d'autres nœuds coopératifs. Dans un autre travail [75], les auteurs ont comparé la consommation d'énergie des systèmes SISO (Single Input Single Output) et MIMO (Multiple Input and Multiple Output) et ont montré que les systèmes MIMO permettent de réaliser de meilleures économies d'énergie et de réduire les délais de bout en bout.

Les antennes directionnelles : ces antennes permettent d'envoyer et de recevoir à la fois des signaux dans une direction donnée, ce qui améliore la portée et le débit de transmission. Les antennes directionnelles peuvent nécessiter des techniques de localisation pour être orientées, mais de multiples communications peuvent avoir lieu à proximité, ce qui entraîne la réutilisation spatiale de la bande passante. Contrairement aux antennes omnidirectionnelles qui émettent dans des directions non désirées, les antennes directionnelles limitent la sur-écoute et, pour une portée donnée, nécessitent moins de puissance. Ainsi, elles peuvent améliorer la capacité et la durée de vie du réseau tout en influant sur les délais et la connectivité. Pour profiter des propriétés des antennes directionnelles, de nouveaux protocoles MAC ont été conçus. Cependant, certains problèmes spécifiques aux antennes directionnelles doivent être pris en compte comme: le brouillage du signal, le réglage des antennes et les problèmes de surdité.

Radio cognitive économe en énergie : une radio cognitive (CR) est une radio intelligente qui peut sélectionner dynamiquement un canal de communication dans le spectre sans fil et adapter ses paramètres de transmission et de réception en conséquence[76]. La technologie SDR (Software-Defined Radio) sous-jacente devrait créer des émetteurs-récepteurs sans fil entièrement reconfigurables qui adaptent automatiquement leurs paramètres de communication aux exigences du réseau, ce qui améliore la connaissance du contexte. Cependant, elle nécessite une consommation d'énergie importante par rapport aux dispositifs conventionnels en raison de la complexité accrue des nouvelles fonctionnalités sophistiquées. Dans ce contexte, la conception de réseaux de capteurs à radio cognitive économes en énergie est un défi majeur dans l'utilisation intelligente de l'énergie des batteries[77]. Des études récentes sur la radio cognitive s'intéressent au contrôle de la puissance des émetteurs et à l'assignation des canaux en fonction de l'énergie résiduelle et à la combinaison du codage de réseau avec les radios cognitives. Les questions de recherche ouvertes comprennent le développement d'approches multicouches pour la couche MAC, le routage ou les protocoles de clustering qui tirent parti des possibilités de la radio cognitive.

2.5.3 Les schémas de mise en veille/réveil

Les états d'inactivité sont les principales sources de consommation d'énergie de la composante radio. Les schémas de mise en veille/réveil visent à adapter l'état radio des nœuds capteurs en

fonction de l'activité du réseau afin de minimiser l'écoute inactive et de favoriser le mode veille, ces régimes sont généralement divisés en trois catégories : sur demande, asynchrone et rendez-vous programmé. Les protocoles basés sur le rapport cyclique sont certainement les plus efficaces sur le plan énergétique, mais ils souffrent d'une latence du mode veille parce qu'un nœud doit attendre que le récepteur soit réveillé. De plus, dans certains cas, il n'est pas possible pour un nœud de diffuser de l'information à tous ses voisins parce qu'ils ne sont pas actifs simultanément. Enfin, la désignation de paramètres tels que les périodes d'écoute et de mise en veille, la longueur du préambule et la durée des slots horaires est un élément important de l'évaluation parce qu'ils influencent les performances du réseau. Par exemple, un faible rapport cyclique permet d'économiser une grande quantité d'énergie mais peut augmenter considérablement les délais de communication. Ainsi, les paramètres du protocole peuvent être spécifiés avant le déploiement par souci de simplicité, bien que cela entraîne un manque de précision et de flexibilité, ou bien ils peuvent être mis en place dynamiquement pour une meilleure adaptation aux conditions de circulation. En ce qui concerne le cycle de service, des travaux ont été réalisés pour adapter la période active des nœuds en ligne afin d'optimiser la consommation d'énergie en fonction de la charge de trafic, des débordements de tampons, des délais ou de l'énergie récoltée.

Radios à réveils passifs : alors que le cycle de service gaspille de l'énergie en raison de réveils inutiles, les radios de faible puissance sont utilisées pour réveiller un nœud uniquement lorsqu'il a besoin de recevoir ou de transmettre des paquets tandis qu'une radio gourmande en énergie est utilisée pour la transmission de données. Les auteurs dans [65] considèrent un réseau composé de radios passives de réveil RFID appelées (WISP-Notes) et de lecteurs RFID. Une radio RFID passive utilise l'énergie diffusée par l'émetteur du lecteur pour déclencher une interruption qui réveille le nœud. Dans la pratique, tous les capteurs ne peuvent pas être équipés de lecteurs RFID car ils consomment beaucoup d'énergie, il s'agit là d'une lacune majeure car, associée à la courte portée opérationnelle des dispositifs passifs RFID, elle limite leur utilisation à des scénarios de sauts uniques. Des simulations ont montré que les (WISP-Notes) peuvent économiser une quantité significative d'énergie au détriment du matériel supplémentaire et d'une latence accrue dans la transmission des données. Les auteurs ont démontré leurs avantages dans le cas d'un réseau à faible densité tolérant aux délais avec des éléments mobiles équipés de lecteurs RFID.

2.5.4 Routage efficace sur le plan énergétique

Le routage est une charge supplémentaire qui peut sérieusement épuiser les réserves d'énergie. En particulier, dans les schémas à sauts multiples, les nœuds les plus proches du puits sont surchargés parce qu'ils doivent acheminer un plus grand nombre de paquets. Par conséquent, leur batterie s'épuise plus rapidement. Dans ce qui suit, nous examinons les mécanismes généraux d'économie d'énergie des différents paradigmes de routage.

- **Les architectures de cluster** : des techniques de cluster ont été proposées pour améliorer l'efficacité énergétique en limitant la consommation d'énergie par différents moyens :
- ✓ En réduisant la portée de communication à l'intérieur du cluster qui nécessite moins de puissance de transmission.

- ✓ En limitant le nombre de transmissions grâce à la fusion effectuée par le chef de cluster (CH).
- ✓ En réduisant les opérations gourmandes en énergie telles que la coordination et le regroupement au niveau du CH.
- ✓ En permettant de mettre hors tension certains nœuds à l'intérieur du cluster, le CH assumant les fonctions de transmission.
- ✓ En permettant de répartir les besoins énergétiques des nœuds par rotation des CHs.

En plus de l'efficacité énergétique, les architectures de cluster améliorent également la scalabilité du réseau en maintenant une hiérarchie dans le réseau.

- **L'énergie comme métrique de routage** : une autre solution pour prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs est de considérer l'énergie comme une métrique dans la phase de configuration. Ainsi, les algorithmes de routage ne se concentrent pas seulement sur les trajets les plus courts, mais peuvent aussi sélectionner le saut suivant en fonction de son énergie résiduelle. Récemment, les auteurs dans [78] ont introduit deux nouvelles fonctions de calcul des coûts sensibles à l'énergie : la fonction ESCFR (Exponential and Sine Cost Function Based Route) permet de faire correspondre une petite variation de l'énergie nodale restante à une grande variation de la valeur de la fonction de coût. En donnant la préférence aux capteurs dont l'énergie restante est plus élevée lors de la sélection de l'itinéraire, la fonction renforce le bilan énergétique. La fonction DCFR (Double Cost Function Based Route) prend en compte le taux de consommation d'énergie des nœuds en plus de leur énergie restante, la raison en est que les nœuds dans les points chauds ont des taux de consommation d'énergie élevés. Ainsi, l'utilisation de cette fonction améliore encore les performances d'équilibrage énergétique du protocole de routage, même dans les réseaux avec obstacles.
- **Le routage à trajets-multiples** : bien que les protocoles de routage à saut unique soient généralement plus simples que les protocoles de routage à sauts multiples, ils peuvent rapidement épuiser l'énergie des nœuds sur le chemin sélectionné. En revanche, le routage multi-sauts permet d'équilibrer l'énergie entre les nœuds en alternant les nœuds de transmission. Par exemple, un protocole de routage multi-trajets a été proposé par [79] qui découvre de multiples trajets disjoints à l'aide d'une fonction de coût dépendant des niveaux d'énergie et des distances de saut des nœuds. Le protocole EECA [80] construit deux itinéraires disjoints et sans collision entre une source et un nœud puits. Les protocoles de routage multi-sauts améliorent également la fiabilité du réseau en fournissant plusieurs routes, ce qui permet au réseau de récupérer plus rapidement après une panne, alors que dans les schémas à trajet unique, lorsqu'un nœud est à court d'énergie, une nouvelle route doit être recalculée.
- **Le placement des nœuds relais** : l'épuisement des nœuds dans une zone donnée peut partitionner le réseau ou créer des trous d'énergie. Parfois, cette situation peut être évitée grâce au placement optimal des nœuds grâce à une distribution uniforme ou à l'ajout de

quelques nœuds relais aux capacités améliorées. Cela permet d'améliorer l'équilibre énergétique entre les nœuds, d'éviter les points chauds des capteurs et d'assurer la couverture et la connectivité [81]. Plusieurs travaux se sont concentrés sur la recherche du nombre minimum de nœuds relais ou leur placement optimal pour prolonger la durée de vie du réseau. Par exemple, les auteurs dans [82] optimisent l'emplacement des puits statiques pour raccourcir la distance de saut moyenne de chaque nœud jusqu'à son puits le plus proche.

- **La mobilité du Puits** : dans les architectures RCSF qui utilisent une station de base statique, les capteurs situés à proximité de la station de base épuisent leur batterie plus rapidement que les autres nœuds capteurs du réseau, entraînant une déconnexion prématurée du réseau. Ceci est dû au fait que tout le trafic est acheminé vers le Puits, ce qui surcharge les nœuds les plus proches de ce dernier. Pour augmenter la durée de vie du réseau, il est possible d'équilibrer la charge entre les nœuds à l'aide d'une station de base mobile[83] qui se déplace sur le réseau pour collecter des informations sur les nœuds. La mobilité du Puits améliore également la connectivité dans les architectures éparses et augmente la fiabilité parce que la communication s'effectue en mode saut unique réduisant ainsi la contention, les collisions et la perte de messages[83]. Lorsqu'il est contrôlable, ce déplacement mobile peut être étudié pour éviter une latence élevée, un débordement de mémoire tampon et l'épuisement de l'énergie.

2.5.5 Rechargement des batteries

Plusieurs études de recherche récentes portent sur les techniques de récupération d'énergie et de recharge sans fil reconnues comme des solutions prometteuses qui visent à recharger les batteries des capteurs sans intervention humaine. Pour la récolte d'énergie, de nouvelles technologies ont été développées pour permettre aux capteurs de capter l'énergie de leur environnement, comme l'énergie solaire, éolienne et cinétique. Par rapport aux capteurs traditionnels, les capteurs rechargeables peuvent fonctionner en continu et, théoriquement, pour une durée illimitée. Ils convertissent l'énergie ambiante en énergie électrique et la consomment directement ou la stockent pour une utilisation ultérieure.

Collecte d'énergie : les architectures de récupération d'énergie nécessitent souvent des schémas de prédiction de l'énergie afin de gérer efficacement la puissance disponible. En effet, les capteurs nécessitent une estimation de l'évolution de l'énergie pour ajuster leur comportement de façon dynamique et durer jusqu'au prochain cycle de recharge, ils peuvent ainsi optimiser des paramètres décisifs tels que la fréquence d'échantillonnage, la puissance d'émission et le cycle de fonctionnement pour adapter leur consommation d'énergie en fonction de la périodicité et de l'ampleur de la source exploitable. Il est important de noter que les nœuds demeurent limités en énergie entre deux périodes de récolte, de sorte qu'ils doivent toujours mettre en œuvre des mécanismes d'économie d'énergie. Par exemple, les nœuds capteurs qui utilisent des panneaux solaires pour recharger leurs batteries peuvent fonctionner intensivement pendant la journée. La nuit, les nœuds peuvent entrer dans un mode conservateur pour utiliser l'énergie stockée. De plus, les nœuds peuvent avoir une distribution d'énergie résiduelle inégale en raison de la différence dans

la quantité d'énergie collectée, et cela doit être pris en compte lors de la conception des protocoles. Par exemple, les nœuds à faible énergie résiduelle peuvent se voir attribuer des périodes de sommeil plus longues et des plages de transmission plus courtes, tandis que ceux à énergie résiduelle élevée peuvent être préférés lors de la sélection d'un chemin de routage. Une autre perspective ouverte est le développement de protocoles qui prennent en compte la dégradation de la batterie dans le temps qui influencera la performance du réseau.

Il existe un intérêt significatif pour la récupération d'énergie pour différentes applications de capteurs sans fil afin d'améliorer leur durée de vie, mais il existe également un besoin équilibré de garantir les performances et d'exploiter efficacement l'énergie disponible. La plupart des études dans le domaine des capteurs sans fil sont basées sur l'état des batteries résiduelles, alors que dans les systèmes de récolte, le problème reste l'estimation de la disponibilité de l'énergie environnementale aux nœuds.

Rechargement sans fil : les récentes avancées dans le transfert d'énergie sans fil devraient accroître la durabilité des RCSF et les rendre perpétuellement opérationnels, puisque ces techniques peuvent être utilisées pour transmettre l'énergie entre les appareils sans qu'il soit nécessaire d'établir un contact entre l'émetteur et le récepteur[84]. Le rechargement des batteries sans fil dans les réseaux RCSF peut être réalisé de deux manières: le rayonnement électromagnétique (EM) et le couplage par résonance magnétique. Dans [85], les auteurs montrent que la technologie du rayonnement électromagnétique omnidirectionnel est applicable à un réseau RCSF à très faible consommation d'énergie et à faible activité de détection (température, lumière, humidité). En effet, les ondes électromagnétiques souffrent d'une baisse rapide de l'efficacité énergétique sur la distance, et la technologie de rayonnement actif peut poser des problèmes de sécurité pour les humains. En revanche, le couplage par résonance magnétique semble être la technique la plus prometteuse pour répondre aux besoins en énergie des réseaux de distribution d'eau souterraine grâce à un système de couplage par résonance magnétique.

Les applications du transfert d'énergie sans fil dans les RCSF sont nombreuses et ont été déjà utilisées pour alimenter des capteurs médicaux et des dispositifs implantables pour réapprovisionner des capteurs encastrés dans le béton et pour alimenter un capteur au sol à partir d'un UAV[84]. L'émergence de la technologie de recharge sans fil devrait permettre de surmonter la contrainte énergétique, puisqu'il est maintenant possible de réapprovisionner les éléments du réseau d'une manière plus contrôlable. Ainsi, certains chercheurs ont déjà étudié l'utilisation de chargeurs mobiles qui alimentent directement les nœuds déployés. Un nouveau défi soulevé par les technologies de chargement sans fil est la coopération énergétique, puisque les nœuds capteurs peuvent maintenant être en mesure de partager l'énergie entre voisins. Ainsi, dans les futurs réseaux sans fil, les nœuds devraient être capables de capter l'énergie de l'environnement et de la transférer à d'autres nœuds, rendant ainsi le réseau autonome. Pour se faire, des études récentes démontrent la faisabilité du transfert d'énergie à sauts multiples, ce qui ouvre de nouvelles perspectives pour la conception de protocoles de charge sans fil et de systèmes coopératifs énergétiques.

2.6 Etat de l'art sur les protocoles de routage efficaces en énergie

Les auteurs dans [86] ont proposé un algorithme de clustering pour économiser l'énergie où le processus d'élection du chef de cluster comprend l'emplacement, l'énergie résiduelle moyenne des nœuds capteurs et l'énergie résiduelle pour chaque nœud capteur. Le nœud capteur devient un CH candidat lorsque l'énergie résiduelle du nœud est supérieure à l'énergie résiduelle moyenne des nœuds de capteur et la durée de vie du réseau est prolongée aussi grâce à l'équilibrage de charge entre les clusters. Cependant, il s'agit d'un algorithme centralisé qui nécessitait les informations de localisation de chaque nœud.

Un protocole de routage appelé LCH (Layered Clustering Hierarchy) a été proposé afin de garantir l'efficacité énergétique et la scalabilité [87]. Dans ce protocole, les nœuds sont organisés selon une structure de regroupement en couches en fonction de leurs distances en nombre de sauts par rapport à la station de base. Chaque couche exécute un protocole d'hierarchisation distribué reposant sur celui du protocole LEACH. La probabilité pour un nœud du réseau de devenir chef de cluster dans une couche est calculée sur la base de la fonction suivante :

$$P_j(t) = \begin{cases} \frac{K_i}{N_i - K_i * (r \bmod \frac{N_i}{K_i})} & \text{si: } C_j(t) = 1 \\ 0 & \text{si: } C_j(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Où N_i est le nombre total de nœuds dans la couche i , r est le nombre de rounds passés et $C_j(t) = 0$ si le nœud a déjà été élu chef de cluster dans le dernier round et 1 sinon.

Le nombre total des nœuds CHs est : $\sum_{Couches} K_i$

Le protocole LCH permet de réduire les chemins vers la station de base et élimine la contrainte de communication directe entre le puits et l'ensemble des nœuds du réseau, en adoptant une communication en multi-sauts. En plus, La réélection aléatoire du CH permet une meilleure distribution de la consommation de l'énergie. Il est à noter que l'organisation en couches permet de réduire le délai de livraison de données car ces dernières sont envoyées d'une couche inférieure vers une couche supérieures, en se rapprochant de la station de base. Cependant, le protocole LCH ne garantit pas une distribution homogène des nœuds CHs sur le réseau car il se base sur l'algorithme LEACH et n'accorde aucune considération à l'énergie des capteurs lors du choix des nœuds CHs ou bien lors de leurs réélections.

Un protocole à routage multi-trajets appelé LIEMR (Low Interference Energy-efficient Multipath ROuting) a été proposé par [88]. Ce protocole améliore la latence, la durée de vie et les paquets en appliquant des trajets nœuds-disjoints. Il inclut un algorithme d'équilibrage de charge pour répartir le trafic du nœud source sur plusieurs chemins en fonction de la qualité relative de chaque chemin et calcule également le coût de la liaison à l'aide de la mesure du nombre de transmissions attendues (ETX). Dans cette méthode, le nœud puits met son coût à zéro et diffuse un paquet de contrôle à ses voisins. Chaque voisin calcule ensuite son coût de liaison par rapport au nœud puits. De plus, il diffuse l'information dans le réseau jusqu'à ce que le nœud source reçoive l'information.

La phase de découverte de route est initialisée dès qu'un événement est détecté sur le réseau, la source envoie la demande de route au nœud puits pour démarrer le processus d'établissement de route. Le chemin avec moins d'énergie résiduelle transmet les données avec un débit plus faible pour économiser l'énergie.

LIEMRO maintient le taux de trafic de manière dynamique en fonction de la qualité des routes, toutefois, il ne tient pas compte du taux de service et de la capacité tampon des nœuds actifs pour ajuster et prédire le taux de trafic des chemins actifs.

Dans [89], les auteurs ont présenté un nouvel algorithme de routage par trajets multiples qui augmente la fiabilité en utilisant des trajets multiples et en programmant les taux de transmission de données à chaque nœud. Cette approche aide à prévenir la congestion et la perte de paquets. Chaque nœud du réseau gère deux files d'attente pour les données entrantes et trois files d'attente pour la transmission des données. De plus, un numéro de priorité est attribué à chaque paquet en fonction de ses informations. Tous les nœuds du réseau agissent comme une unité d'ordonnancement et chaque fois qu'un nœud reçoit le paquet de données, il place le paquet dans la file d'attente appropriée. Plus tard, le nœud sélectionnera le paquet en fonction du numéro de priorité de la file d'attente et programmera une transmission vers ses prochains nœuds multiples disponibles. En utilisant cette approche, le trafic sur le réseau est contrôlé en ajustant la longueur de la file d'attente. Ce protocole fournit un taux élevé de fiabilité en présence d'erreurs de canal. Cependant, il ne permet pas de détecter les nœuds défaillants.

Dans le routage basé sur la localisation, les auteurs dans [90] ont proposé un routage fiable et conscient de l'énergie géoréférencée basé sur la position des capteurs. L'information de localisation utilisée dans le protocole pourrait être extraite du GPS[91]. Chaque nœud envoie ses informations d'emplacement à ses voisins et construit une table de routage.

La table de routage se compose de l'identifiant du nœud voisin et de la distance par rapport à l'élément nœud de destination. La décision d'acheminement est prise par la source à l'aide de la fonction distance et le nœud ayant la distance la plus courte est sélectionné comme candidat pour envoyer l'information.

Un algorithme de routage géographique efficace en énergie a été proposé par [92], il tient compte de trois facteurs pour la décision de routage à savoir : la distance de routage, le brouillage du signal et le coût de calcul. Dans ce protocole, deux méthodes de décision d'acheminement ont été proposées. Dans la première méthode, il prend la décision en fonction de la distance et du brouillage du signal en calculant la distance euclidienne entre le nœud source et le nœud de destination et la puissance de brouillage. Dans la deuxième méthode, il prend la décision en fonction de la puissance maximale absorbée et de la puissance parasite.

Un protocole de clustering basé sur les événements a été proposé par [93]. Lorsqu'un événement est détecté, tous les nœuds proches de l'événement sont actifs et l'un des nœuds proches de l'événement ayant l'énergie résiduelle maximale est élu lui-même comme chef de cluster, le reste des nœuds actifs le rejoignent et forment le cluster. Le chef de cluster choisit le nœud de relais et le nœud de relais de secours vers le puits pour former le trajet multiple. En cas de défaillance de lien, le protocole sélectionne le nœud de relais de secours pour la transmission des données.

Dans [94], un protocole de trajets multiples (PPCMP) basé sur des Clusters Passifs Pratiques a été proposé. Dans ce protocole, le nœud proche de l'événement devient chef du cluster candidat et attend un certain temps. S'il ne reçoit pas d'avertissement du chef de cluster dans ce délai, il devient le chef de cluster et diffuse l'information dans son rayon d'action (R).

2.7 Conclusions et remarques

Au cours des dernières décennies, nous avons assisté à une multiplication des domaines d'application potentiels des réseaux de capteurs sans fil. Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les progrès récents dans le développement de solutions efficaces en énergie pour les RCSF tout en tenant compte des exigences de l'application. Nous avons d'abord catégorisé les différentes applications des RCSF et identifié leurs besoins spécifiques. Ensuite, nous avons introduit une nouvelle taxonomie des schémas d'économie d'énergie et nous avons fourni une analyse complète de la façon dont ces techniques peuvent affecter la performance des applications.

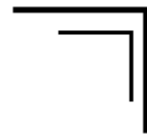
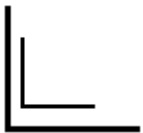
La motivation derrière ce chapitre était la nécessité de minimiser la consommation d'énergie globale des capteurs et de la gérer judicieusement afin de prolonger la durée de vie des RCSF. Dans ce chapitre, nous avons résumé les différentes techniques qui s'attaquent à ce défi et les avons classées en cinq grandes catégories. Comme on l'a vu, les RCSF souffrent d'une capacité de canal limitée et d'interférences entre les nœuds capteurs ou dues à des sources externes. De nombreuses solutions ont été proposées telles que :

- Contrôle adaptatif de la puissance : régler la puissance d'émission à un niveau juste suffisant pour atteindre le nœud de réception voisin prévu, ce qui réduit les interférences.
- Antennes directionnelles : concentrer la puissance d'émission dans la direction du nœud de destination prévu.
- Canaux multiples : les émissions sur différents canaux de fréquences qui ne se chevauchent pas, de sorte qu'un plus grand nombre d'émissions peuvent avoir lieu simultanément sans interférences mutuelles.

Il apparaît également que les exigences en matière d'efficacité énergétique et celles des applications sont fortement dépendantes de sorte que diverses mesures de performance doivent être optimisées conjointement. En effet, les protocoles de routage efficaces en énergie et les systèmes de mise en veille des capteurs influent directement sur la latence du réseau. De même, l'optimisation radio échange la qualité du signal pour la conservation de la batterie, et les approches de réduction des données peuvent affecter la précision de l'information recueillie.

Chapitre III : Contribution 1: Etude comparative avancée des performances des protocoles de routage Ad hoc

*Ce troisième chapitre présente la première contribution que
nous avons apportée dans le cadre de cette Thèse*



3 Chapitre 3 : Contribution 1: Etude comparative avancée des performances des protocoles de routage Ad hoc

3.1 Introduction

Dans les réseaux composés entièrement de stations sans fil, la communication entre les nœuds source et destination peut nécessiter la traversée de sauts multiples car les portées radio sont limitées. Les approches traditionnelles du problème de routage consistant à trouver une séquence de sauts entre l'expéditeur d'un paquet et la destination du paquet fonctionnent en modélisant le réseau sous forme de graphe, et en calculant les chemins les plus courts des paires sur la base des poids des bords de ce graphe. Ces algorithmes de routage distribués décrivent toute la topologie du réseau à tous les nœuds du réseau pour trouver les routes correctes.

Plusieurs protocoles de routage ont été proposés et améliorés pour résoudre les problèmes de routage dans les réseaux Ad hoc. Dans cette contribution, nous nous concentrons sur la problématique du routage des données qui représente le défi majeur dans le déploiement des réseaux Ad hoc.

L'objectif principal de cette contribution est de réaliser une étude empirique basée sur la simulation et l'analyse des réseaux mobiles sans fil à travers différents scénarios de réseau que nous avons mis en œuvre dans notre simulation à l'aide du simulateur OPNET [95]. Dans notre simulation, nous avons utilisé différents protocoles de routage et nous avons également fait une étude comparative avancée sur les performances de ces protocoles en illustrant les résultats obtenus par l'analyse de simulation, le but est d'identifier les protocoles de routage qui peuvent faire l'objet d'un développement afin de les adapter aux RCSF. Les résultats ont montré quels protocoles ont donné les meilleurs résultats et ont mis en évidence un certain nombre de limites de conception.

3.2 Méthodologie de la recherche et d'analyse

Le but principal de l'adoption d'une méthodologie de recherche est de produire de nouvelles connaissances. Dans ce travail nous avons adopté une recherche constructive se basant sur le développement des solutions à un problème donné. Nous divisons notre travail en deux modèles: le modèle théorique et le modèle de simulation. Dans le modèle théorique, nous étudierons différentes problématiques de routage et leurs solutions tandis que dans le modèle de simulation, nous exécuterons les scénarios de simulation du réseau avec la conception MANET et essayerons d'apprendre les mécanismes qui nous aideront à améliorer le routage dans les réseaux mobiles Ad hoc.

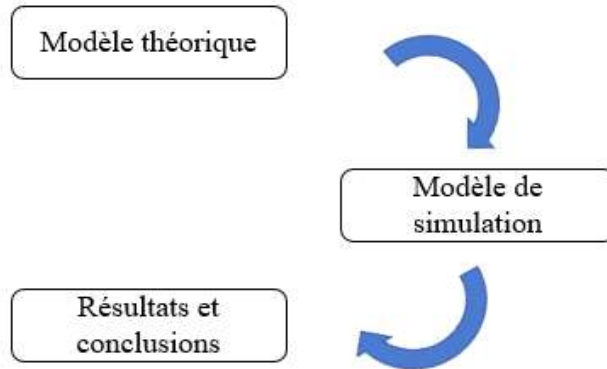


Figure 16: Méthodologie de recherche

Après mûre réflexion, la simulation a été choisie comme méthode d'étude parce qu'elle offre un compromis raisonnable entre l'exactitude de l'observation nécessaire à la mise en œuvre d'un plan d'essai et la perception et le caractère complet de la compréhension fournie par un modèle analytique.

3.3 Les indicateurs de mesure de performance des réseaux

Les mesures de performance sont utilisées comme indicateurs pour décrire les résultats de la simulation et pour évaluer l'efficacité des protocoles de routage. Dans cette contribution, notre analyse est effectuée en faisant varier le nombre de nœuds et la vitesse de mobilité et en étudiant les métriques de performance suivantes :

- ✓ Trafic de routage : cette métrique représente le nombre de paquets transmis dans le réseau.
- ✓ Délai de bout en bout : cette métrique comprend tous les délais possibles dans le réseau causés par la latence de découverte de route, la retransmission par les nœuds intermédiaires, le délai de traitement, le délai de mise en attente et le délai de propagation. Pour calculer la moyenne du délai de bout en bout, nous ajoutons chaque délai pour chaque livraison réussie de paquets de données et divisons cette somme par le nombre de paquets de données reçus avec succès.

$$T_{avg} = \frac{n \sum_{i=1}^{N_r} (H_r^i - H_t^i)}{N_r} \quad (2)$$

Avec les paramètres suivants:

- H_t^i : Temps de transmission du paquet i .
 - H_r^i : Temps de réception du paquet i .
 - N_r : Nombre total des paquets reçus.
- ✓ Débit : le débit désigne le rapport entre le nombre de paquets envoyés et le nombre total de paquets. L'étude du débit sert à décrire le taux de perte que l'on observe habituellement sur la couche de transport et à refléter l'exactitude et l'exhaustivité du protocole de routage. Plus le débit est élevé, plus le protocole est performant. Cette métrique est calculée comme suit:

$$T = \frac{L-C}{L} R f(y) \quad (3)$$

Avec les paramètres suivants :

- L : Longueur du paquet.
 - C : Contrôle de redondance cyclique.
 - R(b/s) : Vitesse de transmission binaire.
 - $f(y)$: Taux de réussite des paquets.
- ✓ Ratio de livraison des paquets : le rapport entre la quantité de paquets de données entrants envoyés par le nœud source et les paquets de données reçus par le nœud de destination. Cette mesure reflète l'efficacité d'un protocole dans la livraison de paquets de données, les performances du protocole de routage sont meilleures lorsque ce rapport est élevé.
 - ✓ Mobilité : désigne le mouvement des nœuds dans le réseau, il peut être faible ou élevé, ce qui entraîne des changements dynamiques de la topologie du réseau.

3.4 Modélisation des MANET

Dans un contexte mathématique, un réseau Ad hoc, en un instant t, peut être représenté par un graphe non orienté :

$G_t = (V_t, E_t)$, où:

V_t : représente l'ensemble des nœuds.

E_t : représente l'ensemble des liens entre ces nœuds (**Figure 17**).

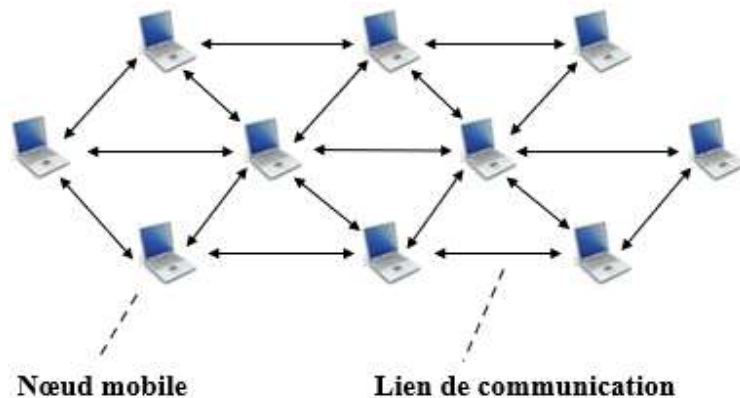


Figure 17: Architecture of Mobile Ad hoc Networks (MANET)

Pour chaque nœud mobile (i), l'ensemble des voisins à saut unique est représenté par :

$$N^1 = \{j \in V : (i, j) \in E\} \quad (4)$$

Alors que l'ensemble des voisins à deux sauts est désigné par :

$$N^2(i) = \coprod_{j \in N^1(i)} N^1(j) - N^1(i) - \{i\} \quad (5)$$

Sur la base de notre étude des différentes classes de protocoles de routage des MANET et de leurs techniques de routage, nous avons établi la classification suivante avec les protocoles de routage standardisés :

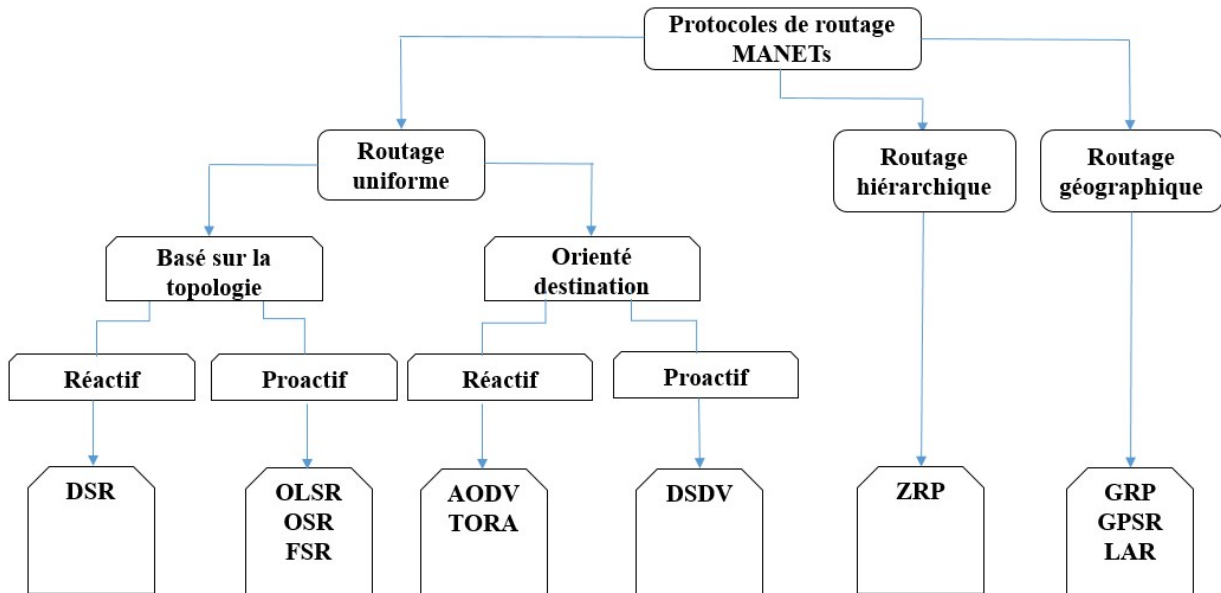


Figure 19: Notre classification des protocoles de routage standardisés des MANET

3.5.1 DSR (Dynamic Source Routing)

Dans le protocole DSR[97], lorsqu'un nœud source a besoin d'une route vers une destination, il initie un processus de découverte de route basé sur les inondations [98]. La source provient d'un paquet RREQ qui est inondé sur le réseau, ce paquet contient une liste de sauts collectée au fur et à mesure de sa propagation sur le réseau. Une fois que le RREQ atteint la destination ou un nœud possédant une route vers la destination, il répond par un RREP en suivant la route inverse de celle empruntée par le RREQ. Cela signifie que la source peut recevoir plusieurs messages RREP correspondant, en général, à différentes routes vers la destination.

DSR [97] sélectionne l'une de ces routes (par exemple la plus courte) et maintient les autres routes dans un cache. Les routes dans le cache peuvent être utilisées comme substituts pour accélérer la découverte de la route si la route sélectionnée est rompue. Pour éviter que les paquets RREQ ne se répandent indéfiniment dans le réseau, les nœuds qui ont déjà traité un RREQ doivent éliminer tout autre RREQ portant le même identifiant.

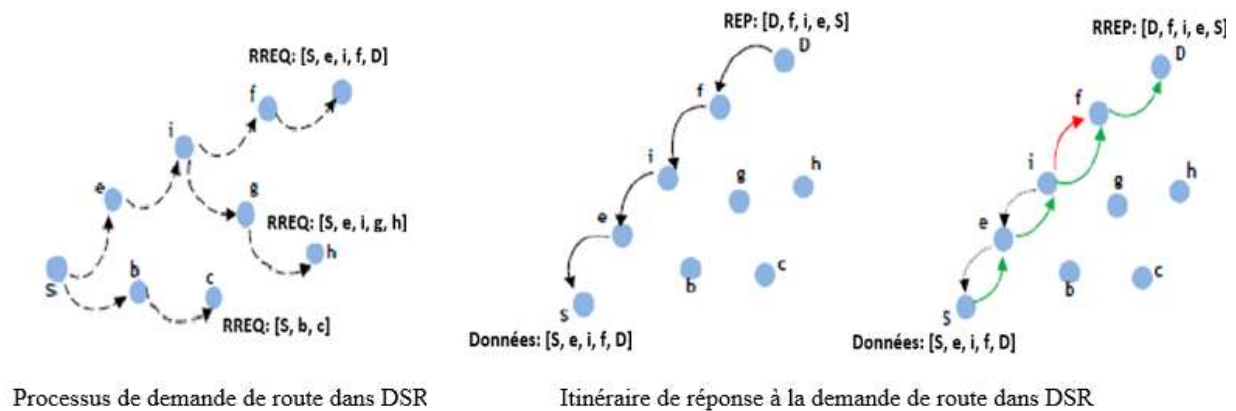


Figure 20: Illustration du processus de routage dans DSR

Le principal avantage du DSR[97] est l'absence de messages de contrôle périodique qui prendrait une partie de la bande passante disponible. Les techniques d'optimisation de la découverte et de l'entretien des routes éliminent davantage la propagation et la diffusion des messages de contrôle. Cependant, ce protocole n'emploie pas de réparation locale d'une liaison rompue et comme tout nœud intermédiaire peut répondre par un message RREP à un message RREQ, en se basant sur son cache de routes, il existe un risque de routes instables sur le réseau. De plus, DSR[97] a été conçu pour un réseau avec un nombre limité de nœuds. Une grande mobilité dans le réseau entraînera de fréquentes ruptures de liaison et une surcharge de routage élevée.

3.5.2 OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)

OLSR[99] est un protocole proactif d'état de liens piloté par table dont la fonctionnalité principale est de construire une table de routage pour chaque nœud du réseau [100]. Le protocole OLSR[99] est une variante du protocole LSR pur et est conçu spécifiquement pour les MANET, il permet d'optimiser le LSR grâce à l'utilisation de nœuds MPR (Multi Point Relay) [101] qui sont sélectionnés et désignés par les nœuds voisins. Le concept de relais multipoints (MRP) est utilisé pour réduire la surcharge du trafic de contrôle et pour aider à fournir le chemin le plus court vers la destination. OLSR[99] convient aux réseaux de grande taille et denses, l'utilisation des messages HELLO permet de mettre à jour les informations sur l'état du lien et les nœuds voisins.

- ✓ **Format des paquets et des messages :** OLSR[99] fournit à chaque nœud une ou plusieurs interfaces OLSR (un dispositif réseau participant à un MANET exécutant OLSR). Ceci est réalisé par la conception et la mise en œuvre d'un format de paquet unifié dans lequel chaque paquet est constitué d'un ou plusieurs types de messages différents. Tous les messages d'un paquet partagent un en-tête commun, de sorte que les nœuds peuvent retransmettre des messages d'un type inconnu.

Le protocole OLSR[99] utilise le protocole UDP (User Datagram Protocol) comme protocole de couche de transport pour la transmission de paquets. La (Figure 21) présente le format des paquets dans ce protocole :

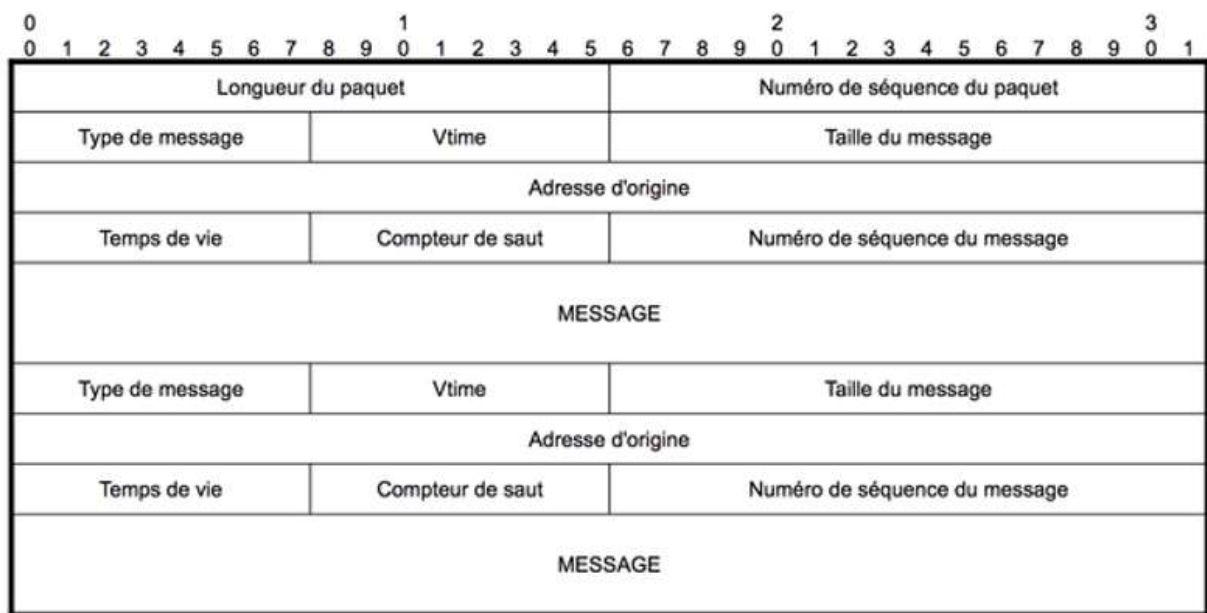


Figure 21: Le format des paquets dans le protocole OLSR[99]

- ✓ **Longueur du paquet** : longueur du paquet (en octets).
- ✓ **Numéro de séquence du paquet** : incrémenté d'une unité à chaque fois qu'un nouveau protocole OLSR est utilisé.
- ✓ **Type de message** : indique le type de message qui est la partie "MESSAGE".
- ✓ **Vtime** : indique la durée après réception, et pour laquelle l'information obtenue dans le message doit être considérée valide par le nœud.
- ✓ **Taille du message** : la taille du message en octets.
- ✓ **Adresse de l'origine** : l'adresse principale du nœud qui a envoyé le fichier message. Un nœud peut avoir plusieurs interfaces avec une seule adresse pour chaque interface. Cependant, chaque nœud doit définir une adresse "principale" unique parmi l'ensemble des adresses dont le nœud dispose.
- ✓ **Temps de vie (TTL)** : le nombre maximum de sauts qu'un message sera transmis.
- ✓ **Nombre de sauts** : indique le nombre de sauts que le message a traversés. L'initiateur met cette valeur à zéro.
- ✓ **Numéro de séquence du message** : numéro d'identification unique attribué au message par la source.

Les messages HELLO accomplissent trois tâches indépendantes : la détection de lien (entre l'interface d'un nœud et les interfaces voisines), la découverte de voisinage et la sélection des MPRs. La détection de lien et la détection de voisinage offrent à chaque nœud une liste de voisins avec lesquels il peut communiquer directement et ensuite l'algorithme de la sélection des MPRs a lieu. Fondamentalement, un relai multipoint est choisi de manière à s'assurer que tous les messages diffusés par un nœud qui est un sélecteur de ce MPR seront reçus par tous les nœuds à une distance de deux sauts du nœud source.

Le message HELLO est encapsulé dans un paquet OSLR et, dans ce cas, le champ Type de message du paquet a comme valeur : « HELLO_MESSAGE ».

✓ **Découverte et maintenance des routes :**

Chaque nœud d'un réseau maintient une table de routage qui permet à un nœud source d'envoyer des paquets de données à un nœud cible. Quatre types différents d'informations sont utilisés pour la construction, le calcul et la maintenance des informations de routage. Chaque nœud du réseau obtient toutes les informations nécessaires à la construction de sa table de routage avec une transmission périodique des messages. Le nœud, lorsqu'il reçoit ces informations, met à jour et recalcule sa table de routage. En cas de rupture d'un lien ou de modification de la topologie du réseau suite à un changement de position d'un nœud dans le réseau, aucun message autre que ceux définis ci-dessus n'est nécessaire pour la mise à jour de la table de routage. La (**Table 1**) montre le de la table de routage d'un nœud dans OLSR.

Adresse de destination	Adresse du saut suivant	Nombre de sauts vers la destination	Interface réseau
Adresse de destination	Adresse du saut suivant	Nombre de sauts vers la destination	Interface réseau
Adresse de destination	Adresse du saut suivant	Nombre de sauts vers la destination	Interface réseau

Table 1: Table de routage dans le protocole OLSR

Les principaux avantages du protocole OLSR[99] sont une faible latence et un taux de transmission de données élevé, car chaque nœud du réseau maintient une table de routage à jour avec toutes les destinations du réseau. Ainsi, aucun temps d'établissement de connexion supplémentaire n'est nécessaire pour qu'un nœud puisse envoyer des paquets de données à un autre nœud du réseau. Cette nature proactive en fait une solution très attrayante dans les réseaux où la faible latence et le taux élevé de transmission des données sont les principales préoccupations. Cependant, le principal inconvénient de ce protocole vient de sa nature proactive et du mécanisme d'inondation, malgré l'utilisation des MPRs, le protocole OLSR[99] peut introduire des coûts de routage élevés, consommant une grande partie de la bande passante disponible. De plus, ce protocole ne prend pas en charge le routage multidiffusion.

3.5.3 AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector)

AODV [102] est un protocole de routage à vecteur de distance initié à la source. Comme le routage est à la demande, une route n'est tracée que lorsqu'un nœud source souhaite établir une communication avec une destination spécifique [103]. La route reste établie aussi longtemps qu'elle est nécessaire pour d'autres communications. De plus, une autre caractéristique du protocole AODV [102] est l'utilisation d'un numéro de séquence de destination pour chaque entrée d'itinéraire inclus dans le RREQ (Route Request) de tout nœud qui souhaite envoyer des données. Ces numéros sont utilisés pour assurer la fraîcheur des informations de routage, un nœud demandeur choisit

toujours l'itinéraire dont le numéro de séquence est le plus élevé pour communiquer avec son nœud de destination.

Une fois qu'un nouveau chemin est trouvé, un RREP (Route Reply) est renvoyé au nœud demandeur. AODV[102] dispose également des mécanismes nécessaires permettant d'informer les nœuds du réseau de toute rupture de lien possible qui aurait pu se produire dans le réseau. Pour éviter de surcharger les nœuds avec des informations sur les routes qui ne sont plus utilisées, les nœuds suppriment ces informations après un délai d'attente.

Lorsque le nœud de destination ou le nœud intermédiaire se déplace, une erreur de route (RERR) est envoyée aux nœuds sources concernés. Quand le nœud source reçoit le RERR, il peut réinitialiser la découverte de route si c'est toujours nécessaire. Les informations de voisinage sont obtenues en diffusant périodiquement des paquets Hello. Pour maintenir les routes, deux méthodes peuvent être utilisées :

- ✓ Messages ACK au niveau de la couche MAC.
- ✓ Messages HELLO dans la couche réseau.

Le principal avantage du protocole AODV[102] est que les routes sont établies à la demande et que les numéros de séquence de destination sont utilisés pour trouver la dernière route vers la destination, le délai d'établissement de la connexion est plus court. L'un des inconvénients de ce protocole est que les nœuds intermédiaires peuvent induire des routes incohérentes si le numéro de séquence source est très ancien et que ces nœuds ont un numéro de séquence de destination supérieur mais pas le dernier, ayant ainsi des entrées périmées. De plus, plusieurs paquets RREP en réponse à un seul paquet RREQ peuvent générer plusieurs paquets de contrôle.

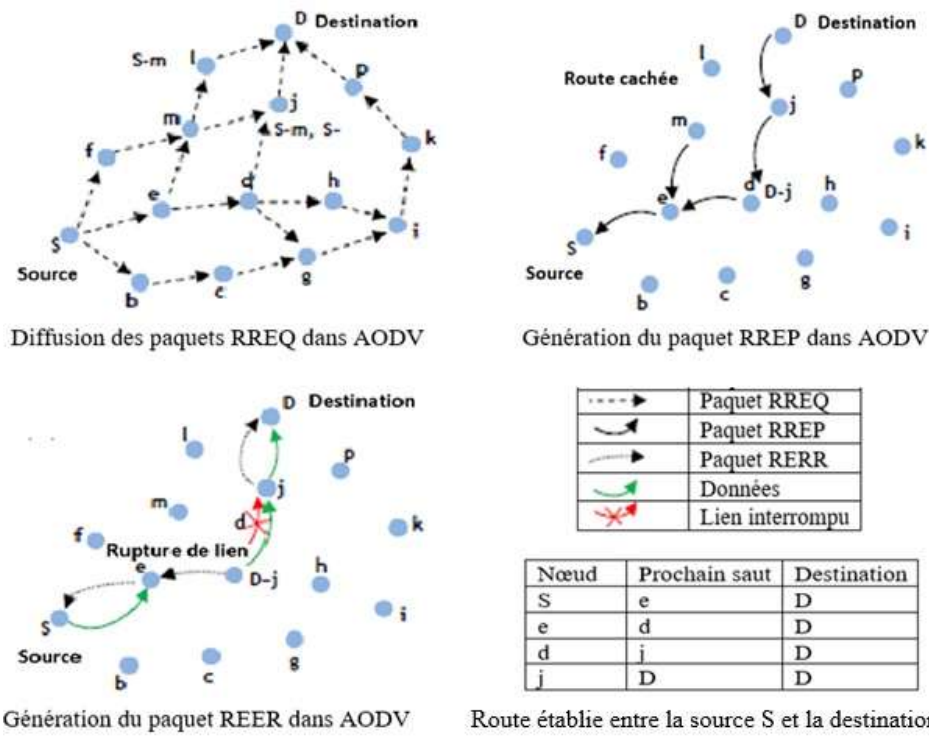


Figure 22: Illustration des processus d'établissement et de maintenance de routes dans AODV[102]

✓ **Format des messages**

Contrairement au protocole OLSR[99], AODV[102] n'introduit pas de nouveaux formats de paquets, autres que les messages de contrôle encapsulés dans un datagramme IP. AODV peut fonctionner avec IPv4 et IPv6 sans autre modification.

Les deux principaux avantages du protocole AODV[102] sont sa nature réactive, qui réduit la surcharge de routage dans le réseau et l'utilisation de numéros de séquence de destination qui adressent les boucles de routage et le problème du comptage à l'infini. Cependant, un message de contrôle peut être introduit lorsque chaque nœud intermédiaire émet un message RREP pour répondre à une demande de découverte de route vers la destination si ce nœud en dispose, ce qui provoque une multitude de messages RREP. Un autre inconvénient de ce protocole est que la propagation de messages HELLO périodiques à partir d'un nœud, pour maintenir la connectivité avec ses nœuds voisins, entraîne une consommation de bande passante.

3.5.4 DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector)

DSDV[104] est un protocole de routage piloté par table représentant une version améliorée de l'algorithme Bellman-Ford distribué où chaque nœud maintient une table qui contient le saut suivant pour atteindre toutes les destinations [100]. Chaque route est marquée d'un numéro de séquence provenant de la destination, indiquant l'ancienneté de la route par rapport à chaque nœud, et gère son propre numéro de séquence en lui attribuant à chaque fois deux numéros plus grands

que l'ancien. Les paquets sont transmis entre les nœuds du réseau en utilisant des tables de routage. Lorsqu'une mise à jour de route avec un numéro de séquence supérieur est reçue, l'ancienne route est remplacée. Dans le cas de routes différentes avec le même numéro de séquence, la route avec la meilleure métrique est utilisée. Les mises à jour sont transmises périodiquement ou immédiatement dès qu'un changement de topologie significatif est détecté. La (**Table 2**) montre la structure de la table de routage d'un nœud :

Destination	Saut	Nombre de sauts	Numéro de séquence	Heure d'installation	Données stables
-------------	------	-----------------	--------------------	----------------------	-----------------

Table 2: Table de routage dans le protocole DSDV

- ✓ **Adresse IP de destination** : le nœud de destination.
- ✓ **Next Hop** : le prochain saut vers cette destination.
- ✓ **Numéro de séquence** : numéro de séquence des informations reçues concernant cette destination.
- ✓ **Nombre de sauts** : le nombre de sauts nécessaires pour atteindre la destination.
- ✓ **Heure d'installation** : indique quand cette entrée a été effectuée.
- ✓ **Données stables** : un pointeur vers la table précédente.

Pour réduire l'information acheminée dans chaque message diffusé, deux méthodes sont utilisées :

- ✓ **Dump complet** : le dump contient toutes les informations de routage disponibles.
- ✓ **Portée incrémentale** : le message ne contient que les informations modifiées depuis le dernier dump complet.

Deux tables de routage sont gérées, l'une pour le transfert des paquets et l'autre pour le routage incrémentiel des paquets d'informations. DSDV[104] garantit un chemin de boucle libre vers chaque destination sans que les nœuds n'aient à participer à un protocole complexe de coordination des mises à jour. Dans ce protocole, les tables de routage de chaque nœud peuvent être visualisées comme formant N arbres, un enraciné à chaque destination.

DSDV[104] présente certains avantages qu'il ne faut pas négliger : tout d'abord, la simplicité du protocole est très similaire à celle du vecteur de distance classique, avec seulement de petites modifications pour éviter les boucles, et avec l'utilisation de numéros de séquence de destination. DSDV[104] présente également une faible latence, car chaque nœud a toujours une route vers n'importe quelle destination du réseau.

L'un des inconvénients de ce protocole est qu'il nécessite une mise à jour régulière de ses tables de routage, ce qui consomme de l'énergie et une certaine quantité de bande passante, même lorsque le réseau est inactif. Deuxièmement, chaque fois que la topologie du réseau change, un nouveau numéro de séquence est nécessaire avant que le réseau ne reconverge. Ainsi, DSDV[104] n'est pas adapté aux réseaux hautement dynamiques. Un autre inconvénient du DSDV[104] est qu'il ne prend pas en charge le mode veille, car chaque nœud du réseau doit diffuser périodiquement des changements ou des mises à jour complètes de sa table de routage. Ces mises à jour fréquentes et

périodiques de routes sur le réseau entraîneront également une forte consommation d'énergie. Enfin, DSDV[104] ne prend pas en charge le routage multicast.

3.5.5 ZRP (Zone routing protocol)

Le protocole ZRP[105] est une corrélation de protocoles proactifs et à la demande (c'est-à-dire qu'il est à la fois piloté par la table et par la demande), il profite des avantages d'un protocole de routage proactif pour la communication sur le voisinage local, et du protocole de routage réactif pour limiter la consommation excessive de la bande passante en raison de l'inondation des paquets de mises à jour et des longs délais dans les demandes de découverte de routes[22]. Un voisinage local de nœuds est appelé zone de routage (représente la distance de saut la plus faible) et elle ne doit pas être supérieure au rayon de la zone. Un nœud conserve les routes vers toutes les destinations de la zone de routage dans sa table de routage. Pour établir une zone de routage, le nœud doit d'abord identifier tous ses membres proches qui sont éloignés d'une certaine distance.

ZRP[105] est développé avec le concept de la zone de maintenance de route, dans les zones limitées, la maintenance des routes est plus facile et le nombre de mises à jour est réduit. Les nœuds situés à la limite de la zone de routage sont appelés nœuds périphériques et jouent un rôle important dans la découverte réactive des routes basée sur la zone. Les nœuds hors de la zone peuvent communiquer via le routage réactif, à cette fin, la demande de route n'est pas inondée sur tout le réseau, seul le nœud périphérique est responsable d'effectuer cette tâche.

L'architecture de ZRP[105] se compose de quatre éléments : fonction de niveau MAC, protocole de routage intra-zone (IARP), protocole de routage intra-zone (IERP) et protocole de routage de diffusion (BRP).

✓ Découverte et maintenance des routes

Le processus de découverte de routes dans ZRP[105] dépend de l'emplacement du nœud de destination. Si le nœud de destination est situé à l'intérieur de la zone intra-zone du nœud source, le protocole agit comme n'importe quel autre protocole proactif, assurant ainsi qu'il y a toujours une route vers n'importe quelle destination dans l'intra-zone. Lorsque le nœud de destination est situé à l'extérieur de la zone intra-zone de la source, le nœud source lance un processus de découverte d'itinéraire et l'IERP est assigné pour accomplir cette tâche. Pour éviter une diffusion à grande échelle des messages de demande de routage, ZRP[105] utilise le protocole BRP (Bordercast Resolution Protocol), qui est une sous-couche du protocole IERP. Le BRP identifie les nœuds situés dans le périmètre de zone du nœud source et transmet les messages de demande de route uniquement à ces nœuds périphériques. Lorsque le nœud source reçoit plusieurs routes vers la même destination, il stocke les routes dans sa table de routage et sélectionne la plus courte en fonction du nombre de sauts.

Il existe un risque de collision lorsque plusieurs nœuds transmettent les messages RREP à la source. Toutefois, le système de diffusion à la frontière minimise la propagation des messages RREQ dans une petite région, sauf lorsque la paire source/destination est située aux extrémités opposées du réseau. Lorsqu'un nœud périphérique n'a pas de route vers le nœud de destination, il génère un

message RREQ et transmet le message à ses nœuds périphériques. Cette procédure se poursuit jusqu'à ce qu'un itinéraire vers la destination soit trouvé.

La gestion des routes a lieu lorsqu'un nœud d'une route active détecte une défaillance de liaison dans la route : le nœud utilise une reconfiguration locale du chemin en recherchant une route alternative vers la destination. Si une telle route existe, le nœud génère un message de mise à jour pour informer tous les autres nœuds de la route et le nœud source d'un changement dans la route. Le nœud source peut continuer à envoyer des paquets de données sur la nouvelle route non optimisée. Si le nœud source veut obtenir une nouvelle route optimale, il régénère un RREQ comme nous l'avons mentionné précédemment.

Métriques qualitatives	Le protocole ZRP
Boucle de routage	Non
Liens unidirectionnels	Oui
Multidiffusion	Partiellement
Mode veille	Partiellement
Schéma de routage	Plat et hiérarchique
Nœuds avec tâches spéciales	Non
Métrique de routage	Plus court chemin

Table 3: Caractéristiques du protocole ZRP

ZRP[105] semble bénéficier des meilleures caractéristiques des protocoles réactifs et proactifs : Il évite d'inonder le réseau de messages de demande de routes à grande échelle, comme le font les protocoles réactifs, et l'échange périodique de messages HELLO dans le schéma proactif. Ainsi, ZRP[105] réduit les coûts généraux de routage d'une manière peu coûteuse. Le seul inconvénient visible du protocole est peut-être que ses performances dépendent fortement du rayon de la zone, si le réseau se compose d'un grand nombre de nœuds à mobilité moyenne à faible ou si la demande de routes est forte, une valeur élevée pour le rayon est préférable pour éviter la diffusion fréquente des demandes d'acheminement et des messages de réponse. D'autre part, si le réseau se compose d'un petit nombre de nœuds à forte mobilité ou si la demande de routes est faible, la valeur du rayon doit également être faible pour éviter les surcharges dues à l'actualisation périodique des messages de routage. En optimisant le rayon de la zone, on peut assurer le meilleur rendement du protocole, ou au moins une meilleure performance que tout autre protocole proactif ou réactif.

Le routage hiérarchique peut réduire la taille des tables de routage et offrir une meilleure évolutivité dans le réseau.

3.5.6 GRP (Geographic Routing protocol)

GRP est un protocole de routage basé sur la position qui utilise le concept de routage géographique où chaque nœud détermine sa position en fonction de différents schémas de positionnement tels que le GPS et le GPRS [106].

Le routage dans GRP se fait de deux manières :

- Le routage gourmand (greedy forwarding) où l'information est envoyée au voisin le plus proche du nœud de destination.
- Le routage périmétrique qui utilise le concept de graphique planaire transversal.

Dans le routage basé sur la position, il n'est pas nécessaire de maintenir des tables de routage en permanence. De plus, ce type de routage donne les meilleures performances dans les topologies dynamiques car les paquets sont transmis à leur destination en fonction de leur position.

3.6 Le simulateur OPNET

L'une des méthodes les plus courantes pour mener des recherches dans les domaines des réseaux et analyser les performances des protocoles de routage en fonction de différents facteurs d'environnement consiste à modéliser différents types de scénarios de simulation. Nous avons utilisé le logiciel OPNET 14.5 (Optimized Network Engineering Tool) [95] dans nos simulations. Il s'agit d'un simulateur de réseau utilisé pour fournir des solutions multiples pour la gestion des réseaux et des applications, par exemple : la recherche et le développement, l'exploitation des réseaux, l'ingénierie réseau, la planification et la gestion des performances [95]. Il est conçu pour la modélisation de différents dispositifs de communication et protocoles afin de simuler les performances de ces technologies. Le choix a été porté sur OPNET [95] car il permet de dessiner et d'étudier les réseaux de communications, les équipements, les protocoles et les applications avec facilité et évolutivité, son approche orientée objet associée à des éditeurs graphiques intégrés de Modeler simplifie la composition des réseaux et des équipements. Son utilisation se divise en quatre étapes principales [107]:

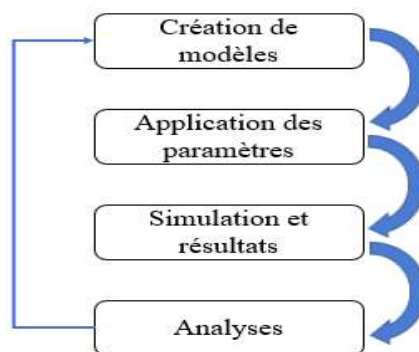


Figure 23: Organigramme du simulateur OPNET

OPNET[95] fournit des solutions pour la recherche académique et l'évaluation et l'amélioration de différentes technologies de réseaux sans fil telles que :

- ✓ WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access).
- ✓ Wi-Fi, UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).
- ✓ Communication fluide et transparente.
- ✓ Conception et évaluation des protocoles MANET.
- ✓ Analyse du réseau optique.
- ✓ Amélioration des technologies de réseau de base comme IPv6, MPLS, etc.
- ✓ Schémas de gestion de l'alimentation dans un réseau de capteurs sans fil.

Notre modèle de simulation sous OPNET[95] bénéficie des caractéristiques suivantes :

- Modélisation du réseau pendant la phase de conception et visualisation des problèmes qui surviennent.
- Reproduction de la structure du réseau à l'aide de l'interface graphique et de la modélisation orientée objet.
- Utilisation d'un modèle de propagation radio proche de la réalité et basé sur le calcul du rapport signal/bruit (SNR).

Dans notre modèle de réseau, chaque nœud peut se déplacer de manière aléatoire dans la portée du réseau en utilisant le modèle de points de cheminement aléatoires (Random Waypoint Model) comme modèle de mobilité où les nœuds sont initialement distribués de manière aléatoire sur le champ de déploiement et où chaque nœud se voit attribuer une destination et une vitesse de mobilité. Les nouvelles destinations sont sélectionnées à partir d'une distribution uniforme, indépendamment des destinations et de la vitesse précédente. Les paramètres de simulation sont énumérés dans la (**Table 4**).

Paramètres	Valeurs
Operation mode	802.11a
Number of nodes	20; 100
Simulation time	60 minutes
Routing protocols	DSR, OLSR, AODV, DSDV, ZRP, GRP
Addressing mode	IPV4
Mobility rate	2 m/s; 10 m/s
Simulation area	1200 m*1200 m
Node movement model	Random waypoint
Data rate (Mbps)	11

Bandwidth (Mbps)	11
Data packet size	128 * 8 bits
Transmit power (w)	0.10
Simulator	OPNET 14.5

Table 4: Paramètres de simulation sous OPNET

Afin de garantir la validité des résultats obtenus dans nos simulations, chaque protocole évalué dans nos simulations représente une classe particulière parmi les classes des protocoles de routage décrites dans notre classification (**Figure 19**).

3.7 Résultats de la simulation

Pour évaluer la performance des protocoles de routage des MANET, notre modèle de réseau a été établi pour deux scénarios de simulation différents selon les paramètres de simulation :

3.7.1Premier scénario

Dans ce premier scénario nous avons déployé 20 nœuds mobiles avec une vitesse de mobilité de 2 m/s en utilisant les paramètres de simulation mentionnés dans la (**Table 5**). Ce scénario a pour objectif d'étudier l'impact de la faible densité du réseau et de la faible mobilité des nœuds sur la performance du réseau.



Figure 24: Environnement de simulation du scenario 1 dans OPNET.

3.7.1.1 Charge du trafic

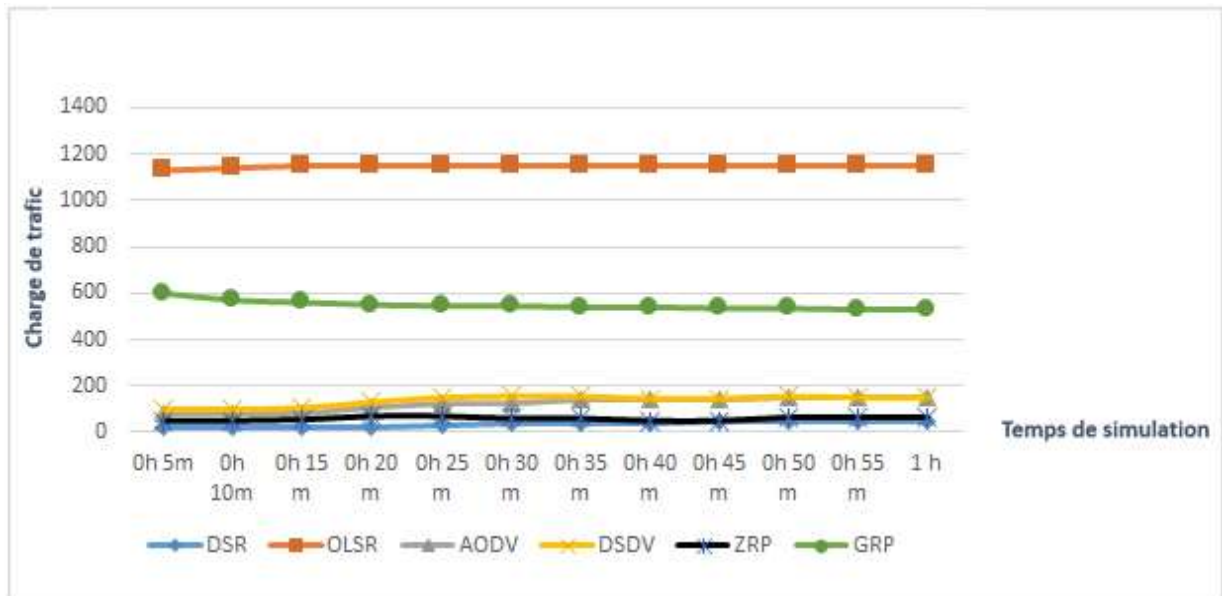


Figure 25: Évaluation de la charge de trafic dans le scénario 1

Dans la **(Figure 25)**, nous comparons la moyenne de la charge de trafic entre les protocoles de routage, on peut voir que DSR montre la charge de trafic la plus faible suivie par ZRP et AODV tandis que OLSR montre le niveau le plus élevé de la charge de trafic.

Dans les petits réseaux, le protocole DSR génère moins de trafic de routage car la prévalence des liaisons rompues est un facteur qui n'a pas beaucoup d'influence. Alors que le protocole OLSR génère plus de surcharge de communication et requiert plus de temps de maintenance du fait qu'il s'agit d'un protocole d'état de lien qui utilise une approche pilotée par les tables.

3.7.1.2 Délai

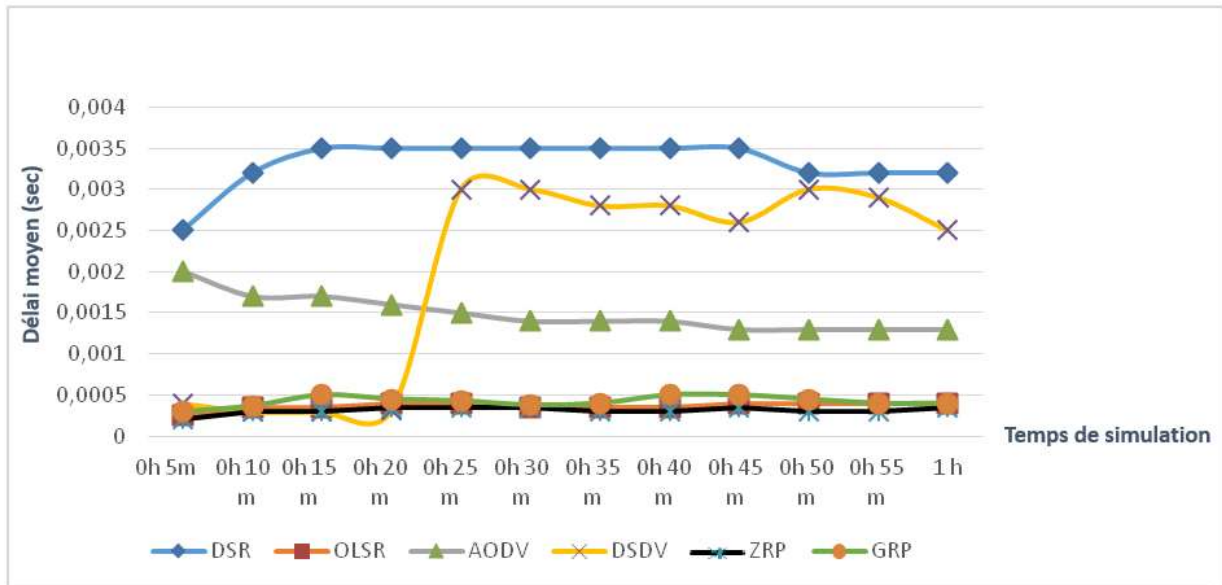


Figure 26: Évaluation du délai de communications sans fil dans le scénario 1

Comme l'on peut voir sur la (**Figure 26**), le protocole ZRP présente le plus faible délai, suivi par OLSR et GRP, tandis que DSR enregistre le délai le plus élevé.

Dans le protocole AODV, la table de routage dispose d'une route pour chaque destination qui est mise à jour en permanence sur la base du numéro de séquence, ce processus de recherche de route influence le délai. De plus, lorsque les paquets de contrôle (Request to send, Clear to Send) sont abandonnés en raison d'une largeur de bande limitée, ils peuvent être retransmis à plusieurs reprises, ce qui augmente le délai.

Le protocole DSR utilise des routes mises en cache et le plus souvent, il envoie le trafic sur les routes obsolètes, ce qui peut entraîner des retransmissions et des délais excessifs. Ainsi, dans les réseaux avec une forte densité, l'augmentation du nombre de connexions génère des délais plus importants. D'autre part, le protocole DSR tente de minimiser l'effet des routes obsolètes en utilisant des liaisons à trajets multiples et nécessite plus de temps pour converger avant d'utiliser une route puisqu'il est basé sur des diffusions périodiques.

3.7.1.3 Débit sans fil

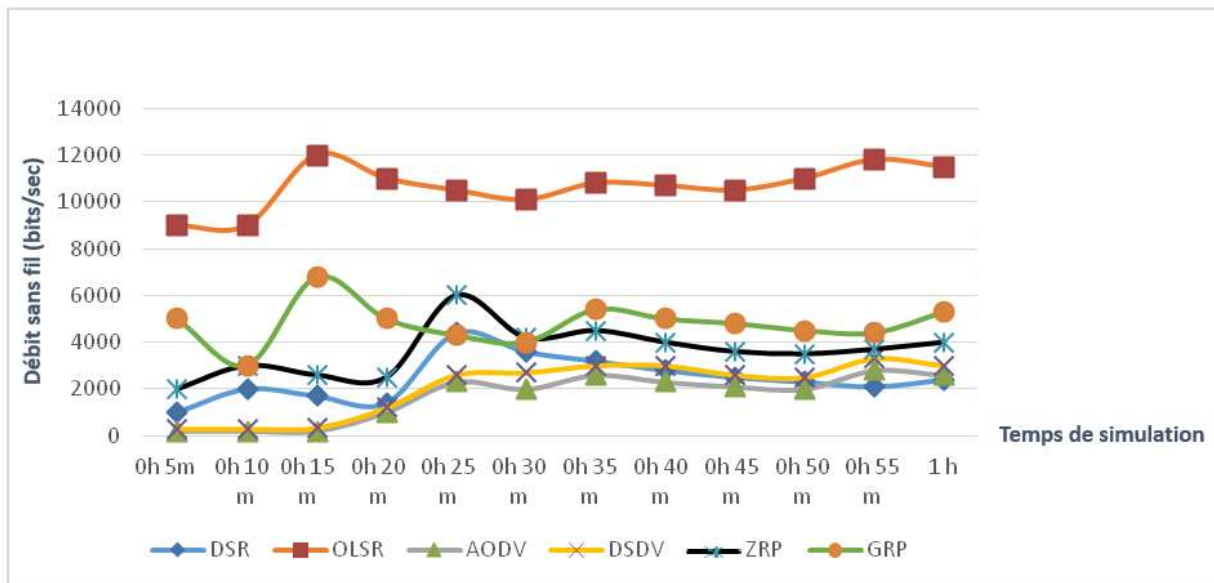


Figure 27: Évaluation du débit de communications dans le scénario 1

La (Figure 27), montre que le protocole OLSR présente le débit le plus élevé, suivi par GRP et ZRP, tandis que le protocole AODV présente le débit le plus faible.

Comme OLSR est un protocole de routage proactif, les routes sont immédiatement disponibles pour le routage. Ce protocole maintient des chemins cohérents dans le réseau, ce qui se traduit par un faible délai et un débit plus élevé.

3.7.1.4 Ratio de livraison de paquets (PDR)

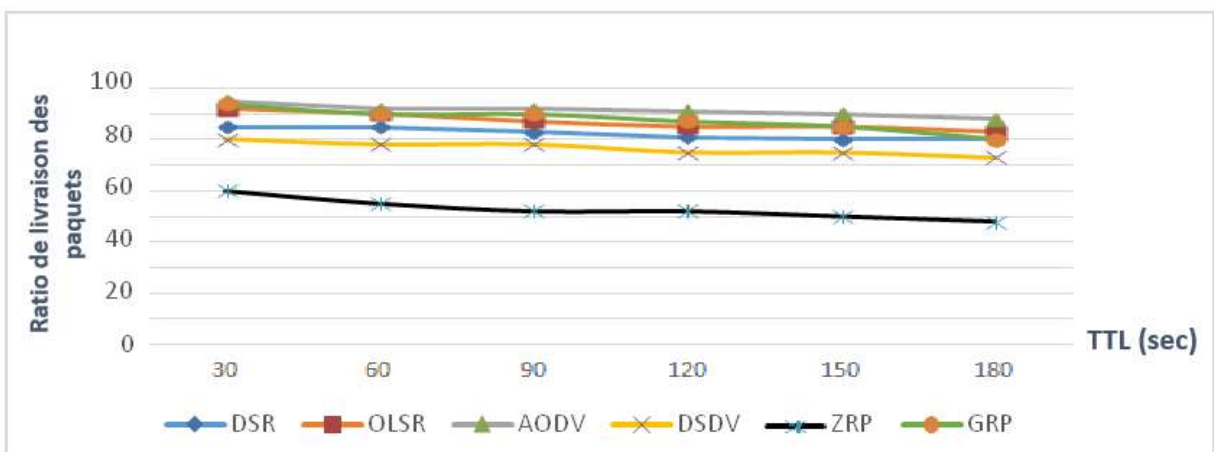


Figure 28: Évaluation du ratio de livraison de paquets dans le scénario 1

Comme le montre la (Figure 28), AODV a globalement, la meilleure performance. Ce protocole est une amélioration des protocoles DSR et DSDV et présente les avantages des deux. Le protocole

DSR utilise des routes obsolètes en raison du nombre important de routes mises en cache, ce qui entraîne des retransmissions de paquets assez fréquentes et un ratio de livraison de paquets moyen.

3.7.2 Deuxième scénario

Une propriété souhaitable d'un protocole est d'avoir un comportement stable quel que soit le nombre de nœuds du réseau. L'objectif de ce deuxième scénario est d'étudier l'impact de la forte densité du réseau et de la mobilité des nœuds élevée sur la performance du réseau et des protocoles de routage. Dans ce scénario, nous utilisons la même zone de simulation que celle du scénario précédent et augmentons le nombre de nœuds et leur mobilité dans le réseau. Nous déployons 100 nœuds mobiles avec une vitesse de mobilité de 10 m/s dans le même environnement de simulation mentionné dans la (Table 5).

3.7.2.1 Charge du trafic

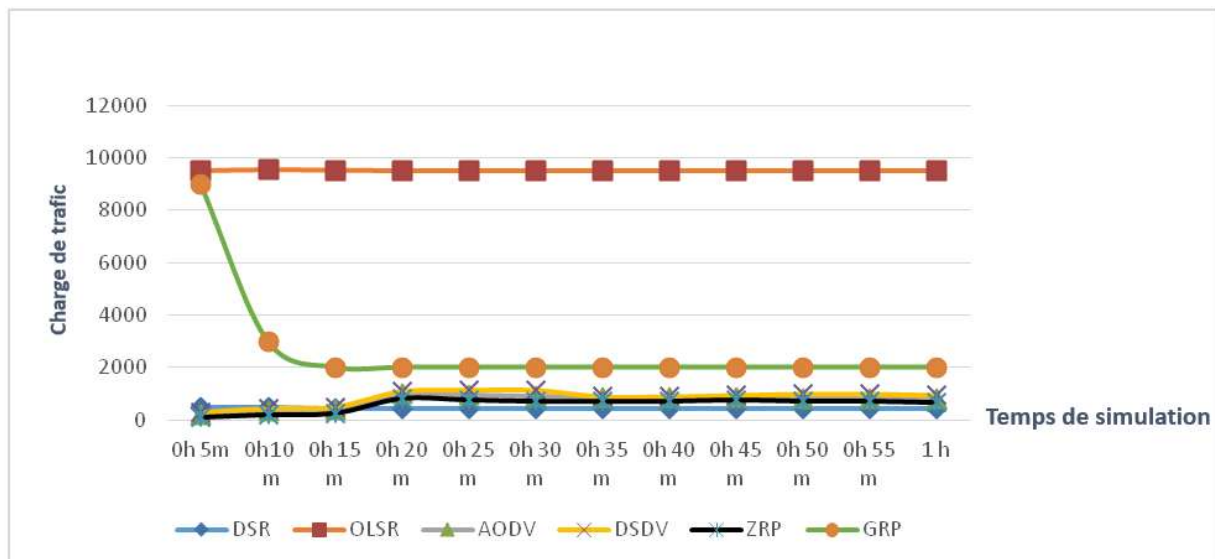


Figure 29: Évaluation de la charge de trafic dans le scénario 2

La (Figure 29) montre que le protocole OLSR génère la charge de trafic maximale, suivi par GRP et par DSDV, tandis que le protocole DSR génère la charge de trafic la plus faible. De plus, on peut observer pour le protocole GRP que le trafic diminue considérablement puis se stabilise pendant le reste de la simulation.

3.7.2.2 Délai

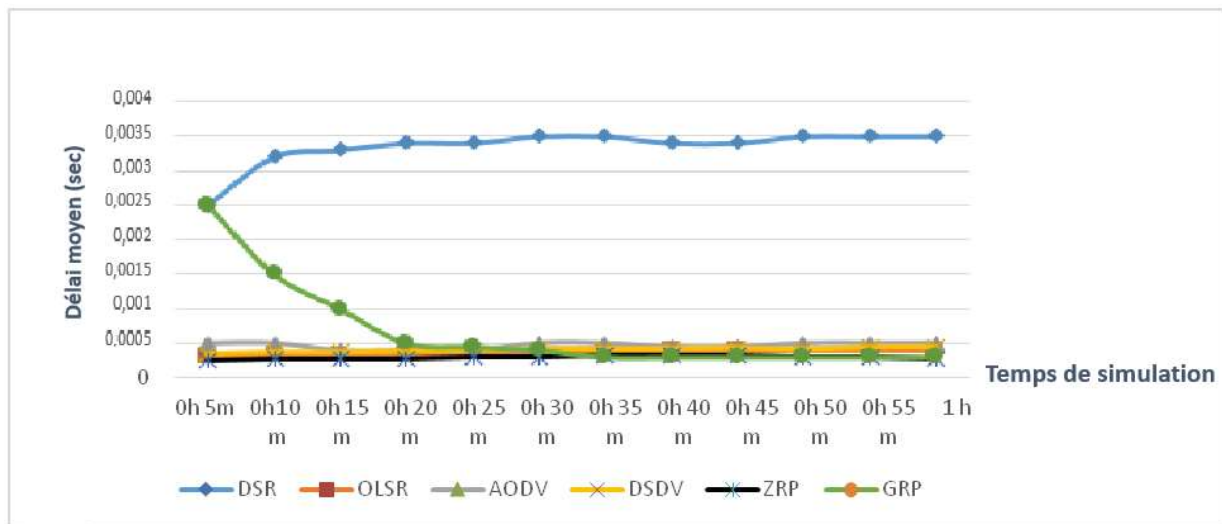


Figure 30: Évaluation du délai de communications sans fil dans le scénario 2

Selon la (**Figure 30**), on remarque que le protocole DSR offre un délai élevé en raison de la perte d'informations de distance et du fait que la construction de routes peut ne pas se produire rapidement car chaque nœud intermédiaire traite les informations avant d'envoyer une réponse, ce qui allonge le processus de recherche d'itinéraire.

Nous observons également que le protocole OLSR présente l'un des délais les plus faibles, puisqu'il s'agit d'un protocole de routage proactif, les connexions réseau sont toujours prêtes lorsque la couche applicative a du trafic à transférer. Les mises à jour périodiques permettent de garder les chemins de routage disponibles et l'absence de latence élevée induite par le processus de découverte de routes dans OLSR explique son délai relativement faible.

Avec un plus grand nombre de nœuds mobiles, les performances du protocole OLSR rivalisent avec celles du protocole AODV. On peut également observer que le protocole GRP offre un bon délai dans le cas d'un nombre important de nœuds dans le réseau.

3.7.2.3 Débit sans fil

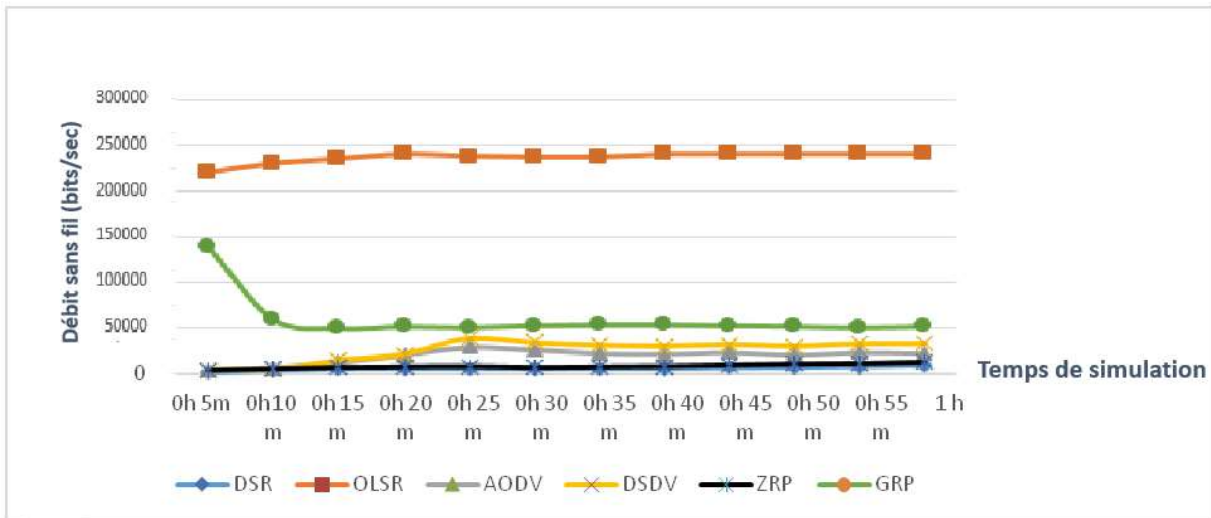


Figure 31: Évaluation du débit de communications dans le scénario 2

D'après la (Figure 31), nous pouvons constater que le débit diminue rapidement après que le débit de bout en bout ait atteint sa valeur maximale. Dans les réseaux sans fil, la largeur de bande totale disponible est limitée et le partage spatial de cette largeur de bande limitée entre les nœuds voisins diminue encore la largeur de bande par flux de trafic.

Dans ce scénario de simulation, on observe que le débit du protocole AODV diminue rapidement car la bande passante disponible est principalement utilisée dans le mécanisme de recherche de route. Tandis que les protocoles ZRP et DSR offrent un débit très faible par rapport aux autres protocoles de routage.

3.7.2.4 PDR Ratio de livraison de paquets (PDR)

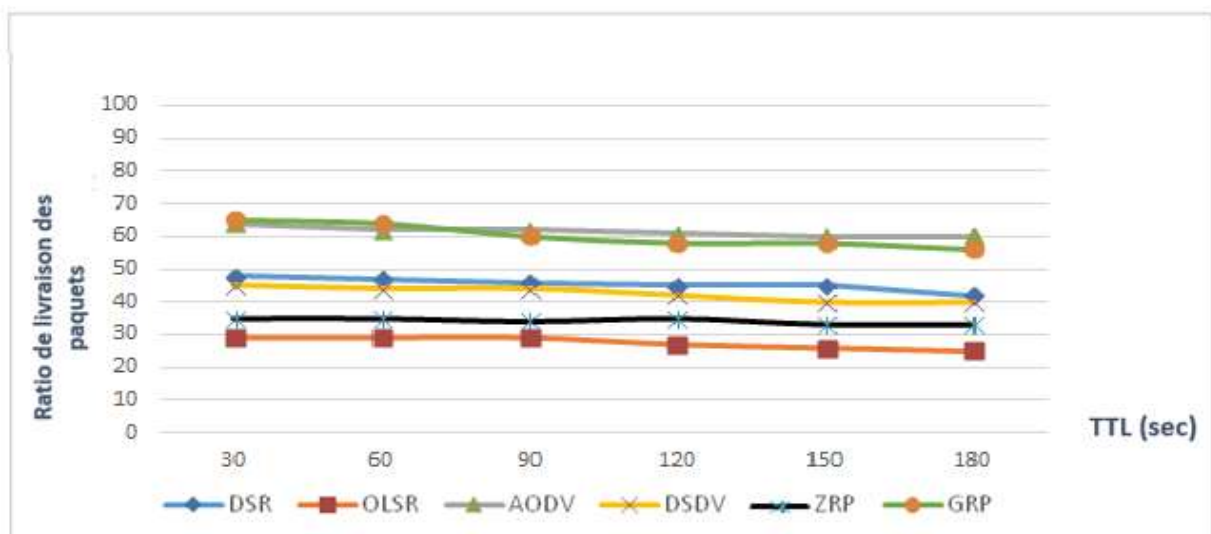


Figure 32: Évaluation du ratio de livraison de paquets dans le scénario 2

Comme l'on peut voir sur la (**Figure 32**), le taux de livraison des paquets diminue à mesure que la vitesse de mobilité augmente, car la rupture de la liaison peut se produire plus fréquemment, ce qui entraîne un taux élevé de perte de paquets.

Le protocole DSR montre un taux de livraison de paquets plus élevé dans les réseaux à haute densité car il utilise les routes les plus récentes et les plus fiables lorsque cela est nécessaire. Le protocole AODV offre un taux de livraison de paquets meilleur que celui des autres protocoles.

En résumant les résultats obtenus à travers nos simulations, on peut conclure que :

- 1) En général, les protocoles réactifs sont plus efficaces que les protocoles proactifs en termes de taux de livraison de paquets et de débit.
- 2) Le protocole DSR est plus performant dans les petits réseaux à n'importe quelle vitesse de mobilité.
- 3) Le protocole AODV donne ses meilleurs résultats dans les réseaux à nombre de trafic relativement élevé et offre un meilleur délai avec les réseaux à haute densité.
- 4) Le protocole OLSR présente un délai très faible dans les deux scénarios de simulation et que la mobilité n'affecte pas la densité du trafic dans ce protocole, mais elle augmente avec la charge du réseau. De plus, ce protocole a un débit constant dans les deux cas de vitesse de mobilité en raison de sa nature proactive qui lui permet de gérer des tables de routage consistantes offrant un délai cohérent. Il convient de noter que si le réseau se densifie, les tables de routage OLSR peuvent devenir trop importantes, ce qui entraîne une congestion du réseau et une dégradation des performances.

Protocoles	Conclusions
DSR	Très adapté aux réseaux à faible densité. Par conséquent, il générerait un trafic de routage plus important dans les environnements IPv6.
OLSR	Très adapté aux réseaux à haut débit. Le trafic de routage élevé montre que le protocole OLSR n'est pas adapté aux réseaux à faible densité.
AODV	Convient aux réseaux à faible et moyenne densité et à faible vitesse de mobilité.
DSDV	Protocole lent car il utilise une mise à jour périodique et basée sur les événements, ce qui entraîne un contrôle excessif dans le processus de communication.
ZRP	La valeur du rayon de la zone détermine ses performances. Cette valeur doit être faible pour obtenir de meilleures performances.

GRP	Réduit considérablement la signalisation (paquets de contrôle), en particulier dans les grands réseaux dynamiques.
-----	--

Table 5: Tableau comparatif des protocoles de routage étudiés selon les résultats de nos simulations

3.8 Conclusion

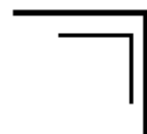
La topologie du réseau d'un MANET peut être dynamique et imprévisible. Les protocoles de routage traditionnels utilisés pour les réseaux câblés ne peuvent pas être appliqués directement à la plupart des réseaux sans fil parce que certaines hypothèses les plus courantes ne sont pas valables dans ce type de réseau.

Dans cette contribution, et afin de mettre en œuvre des solutions de routage, nous avons étudié six protocoles de routage Ad hoc appartenant à différentes classes (DSR, OLSR, AODV, DSDV, ZRP, et GRP) en tenant compte de deux paramètres clés qui influencent leur mise en œuvre : la densité du réseau et le taux de mobilité des nœuds.

Tout d'abord, nous avons implémenté ces protocoles de routage et nous avons réalisé une étude comparative approfondie sur la base de métriques de performance. Les objectifs étaient de mieux comprendre les limites des protocoles étudiés, de révéler les défauts de conception et de s'en servir pour optimiser la performance. Sur la base des résultats prometteurs présentés dans cette contribution, nous nous focaliserons sur les questions restantes et nous travaillerons sur l'adaptation de ces protocoles de routage et sur la conception d'un modèle de protocole de routage tenant compte de la contrainte d'énergie et dédié aux applications de réseaux de capteurs sans fil.

Chapitre IV : Contribution 2: Conception d'un protocole de routage basé sur AODV et sur la hiérarchisation du réseau pour la minimisation de l'énergie consommée dans les RCSF

Ce quatrième chapitre présente la deuxième contribution que nous avons apportée dans le cadre de cette Thèse pour répondre à la problématique de consommation d'énergie dans les RCSF



4 Contribution 2 : Conception d'un protocole de routage basé sur AODV et sur la hiérarchisation du réseau pour la minimisation de l'énergie consommée dans les RCSF

4.1 Introduction

Ce chapitre présente notre nouvelle approche de routage de données à haut rendement énergétique spécialement conçue pour les RCSF. Elle est basée sur la combinaison d'un schéma de routage AODV amélioré et sur la hiérarchisation du réseau en plusieurs couches tout en maintenant une faible complexité, une grande extensibilité et une bonne qualité de service. L'objectif est de proposer une approche de routage répondant aux défis imposés par la ressource énergétique limitée afin de maximiser la durée de vie du réseau et d'assurer une meilleure qualité de service. La solution proposée intègre les paramètres énergétiques ainsi que le nombre minimum de sauts dans le processus décisionnel du routage de données. Les résultats de la simulation évalués à travers le simulateur de réseau (NS-2), ont montré l'efficacité de l'approche proposée en termes d'efficacité énergétique et de durée de vie du réseau.

4.2 Motivation pour la conception de protocoles de routage efficaces en énergie

Le réseau de capteurs sans fil est un réseau à sauts multiples où les données sont transmises par les nœuds capteurs intermédiaires, les liens entre les nœuds sont très susceptibles de se rompre ce qui affecte directement le taux de transmission des données et diminue la fiabilité du réseau. Ce problème motive à concevoir des techniques de routage fiables et efficaces en énergie.

La conception d'un protocole de routage pour les RCSF dans les applications de contrôle/surveillance rencontre plus de défis que dans les applications traditionnelles, à savoir :

Déploiement des nœuds: le déploiement des nœuds capteurs dépend entièrement des applications. Dans certaines applications, un déploiement structuré est nécessaire où les capteurs sont physiquement placés et l'information est dirigée par des moyens prédéterminés alors que dans certains scénarios, un déploiement aléatoire est utilisé où l'emplacement des nœuds n'est pas prédéfini. Ces derniers sont généralement lancés depuis un avion dans la zone hostile ou sans surveillance. Le type de déploiement du nœud affecte fortement les performances du réseau.

Délai : les données mesurées par les capteurs doivent parvenir au nœud puits dans un certain délai. Cette métrique représente une mesure très importante de la qualité de service car elle influence la performance et la stabilité des systèmes de contrôle. La gigue de délai peut être difficile à compenser, surtout si sa variabilité est importante. De plus, l'exigence au niveau du délai de

transmission des paquets est importante puisque la retransmission de paquets de données pour maximiser la fiabilité peut augmenter le délai.

Efficacité énergétique: l'absence d'opérations de remplacement de la batterie des RCSF nécessite des opérations économes en énergie. Étant donné qu'une fiabilité élevée et un faible délai peuvent nécessiter une consommation d'énergie importante, des paramètres de conception flexibles qui répondent toujours aux exigences doivent être définis afin d'empêcher les impacts sur la durée de vie du réseau.

Schéma de trafic des capteurs: le type et la quantité de données à transmettre sont également importants dans les demandes de contrôle. Les signaux de détection d'informations peuvent être divisés en deux catégories: en temps réel et par événement. Pour la détection en temps réel, les signaux doivent être reçus dans un délai spécifié pour le bon fonctionnement du système. Afin de permettre un contrôle en temps réel, les réseaux doivent être en mesure de garantir le délai d'un signal dans un intervalle déterminé. Par conséquent, un trafic important peut être généré si les capteurs envoient des données très fréquemment.

Les signaux basés sur les événements sont utilisés par le capteur pour prendre des décisions mais n'ont pas de date limite. La décision est prise si le système reçoit un signal ou si le délai d'attente est atteint.

Adaptation: l'exploitation du réseau doit s'adapter aux changements des exigences de l'application, des canaux sans fil variant dans le temps et des variations de la topologie du réseau. Par exemple, l'ensemble des exigences de l'application peut changer dynamiquement et le protocole de routage doit adapter ses paramètres pour satisfaire aux exigences spécifiques de l'application. Pour supporter la conception basée sur un modèle analytique au lieu d'une conception fondée sur l'expérience, il est essentiel d'avoir des modèles analytiques décrivant la relation entre les paramètres du protocole et les indicateurs de performance (fiabilité, délai, consommation d'énergie, etc.).

Scalabilité: comme les ressources de traitement au niveau des nœuds capteurs sont limitées, les calculs nécessaires à la mise en œuvre du protocole doivent être légers sur le plan informatique. Ces opérations devraient être effectuées au sein du réseau, afin d'éviter les communications supplémentaires avec un coordinateur central. Par conséquent, le compromis entre la traçabilité et la précision du modèle analytique est très important. Le protocole doit également pouvoir s'adapter aux variations de la taille du réseau, par exemple celles causées par l'ajout de nouveaux capteurs.

Fiabilité: les données mesurées par les capteurs doivent être envoyées au nœud puits du réseau avec une probabilité de succès donnée, car des mesures manquantes pourraient empêcher l'exécution correcte des actions ou des décisions de contrôle. Cependant, la maximisation de la fiabilité peut augmenter considérablement la consommation d'énergie du réseau. Par conséquent, les concepteurs de réseaux doivent tenir compte du compromis entre la fiabilité et la consommation d'énergie.

4.3 Le modèle d'énergie utilisé

Dans le contexte des RCSF, les modèles énergétiques sont utilisés pour évaluer la consommation d'énergie de tous les éléments du réseau et estimer sa variation dans plusieurs conditions de déploiement, ces modèles peuvent être de trois types :

- ✓ Les modèles énergétiques analytiques qui utilisent une description mathématique de l'environnement d'exploitation.
- ✓ Les modèles énergétiques expérimentaux basés sur certaines valeurs mesurées expérimentalement sur des appareils du monde réel.
- ✓ Les modèles énergétiques théoriques qui fournissent la relation entre la consommation d'énergie et la charge de trafic de manière efficace.

Pour modéliser les communications entre les nœuds, nous avons utilisé le modèle DDG (Unit Disc Graph), avec RT_x comme rayon de transmission où le réseau est considéré comme un graphe non orienté $G=(E,V)$. On suppose que deux nœuds peuvent communiquer entre eux si la distance euclidienne qui les sépare n'est pas supérieure à une portée de transmission donnée.

$$E = \{(u, v) \in V^2 \mid dist(u, v) \leq R_{Tx}\} \quad (7)$$

Le modèle énergétique du nœud capteur dans n'importe quel protocole de routage peut aider à améliorer la performance du réseau. Un modèle d'énergie défini avec précision et avec une vue détaillée et une approche correcte peut donner une meilleure estimation de l'énergie restante dans chaque nœud et rendre la surveillance simple et directe, ce qui peut aussi améliorer la durée de vie du réseau.

L'énergie consommée par les modules de détection ainsi que celle du traitement ne sont pas prises en compte car elles sont relativement négligeables par rapport à l'énergie consommée par le module de communication. Pour simplifier, nous considérons que :

$$E_{tot}(Sensor) = E_{sens} + E_{proc} + E_{com} \quad (8)$$

$$E_{tot}(Sensor) \approx E_{com} \quad (9)$$

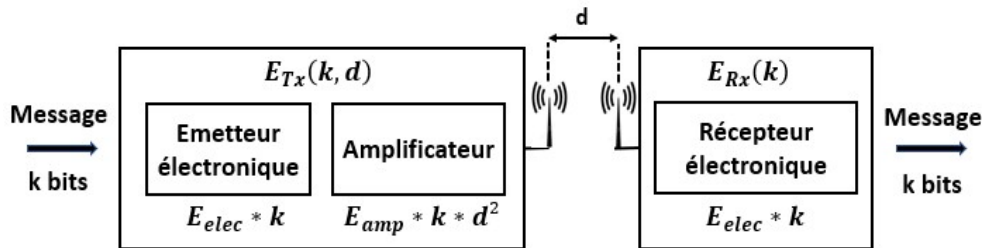


Figure 33: Module de consommation d'énergie dans les RCSF[108]

Pour transmettre un message de k bits à un récepteur situé à d mètres, l'émetteur consomme :

$$E_{Tx}(k, d) = (E_{elec} * k) + (E_{amp} * k * d^2) \quad (10)$$

Pour recevoir un message de k bits, le récepteur consomme :

$$E_{Rx\ elec}(k) = E_{elec} * k \quad (11)$$

Où E_{elec} représente l'énergie de transmission électronique et E_{amp} représente l'énergie d'amplification.

4.4 Le schéma de routage proposé

L'algorithme de routage que nous proposons est une amélioration du protocole de routage AODV basé sur une hiérarchisation du réseau en k couches et sur l'utilisation d'une métrique combinant l'énergie et les distances entre les nœuds dans le processus de routage des données. Le routage à sauts multiples entre les couches est assuré par les nœuds relais responsables également de l'agrégation des données de la couche inférieure à la couche supérieure, ce qui réduit la quantité de données et la redondance des paquets et améliore l'efficacité énergétique et l'équilibrage des charges. Le paramètre d'énergie est intégré dans les tables de routage et dans les paquets de demande de route (RREQ) et de réponse de route (RREP) en ajoutant un champ contenant les énergies résiduelles des nœuds traversés par l'acheminement. Le schéma de routage proposé peut être divisé en trois phases : la phase d'initialisation par la mise en place des K-couches, la phase de communication et la phase de maintenance des routes.

4.4.1 La phase d'initialisation

La station de base (BTS) diffuse un message d'inondation pour calculer/estimer la distance aux nœuds à un saut, qui à leur tour transmettront ce message aux nœuds capteurs du saut suivant. Cette opération sera répétée jusqu'à ce que tous les capteurs soient explorés, entre-temps, des chemins inverses vers la BTS sont établis progressivement. Une topologie en couches est appliquée aux nœuds du réseau en fonction du nombre de sauts que chacun d'entre eux effectue pour atteindre la station de base. Une couche i représente les nœuds de capteurs avec un nombre de sauts de 2^i avec $i \in \mathbb{N}^*$. Par conséquent, plusieurs couches sont mises en place avec une distance de deux sauts entre une couche N et la couche N-1. Cette méthode permet de minimiser le nombre de messages de contrôle échangés pour structurer la topologie et de mieux optimiser la phase de routage. A la fin de cette phase, chaque nœud a connaissance de son identifiant et du numéro de la couche reflétant sa distance par rapport à la station de base.

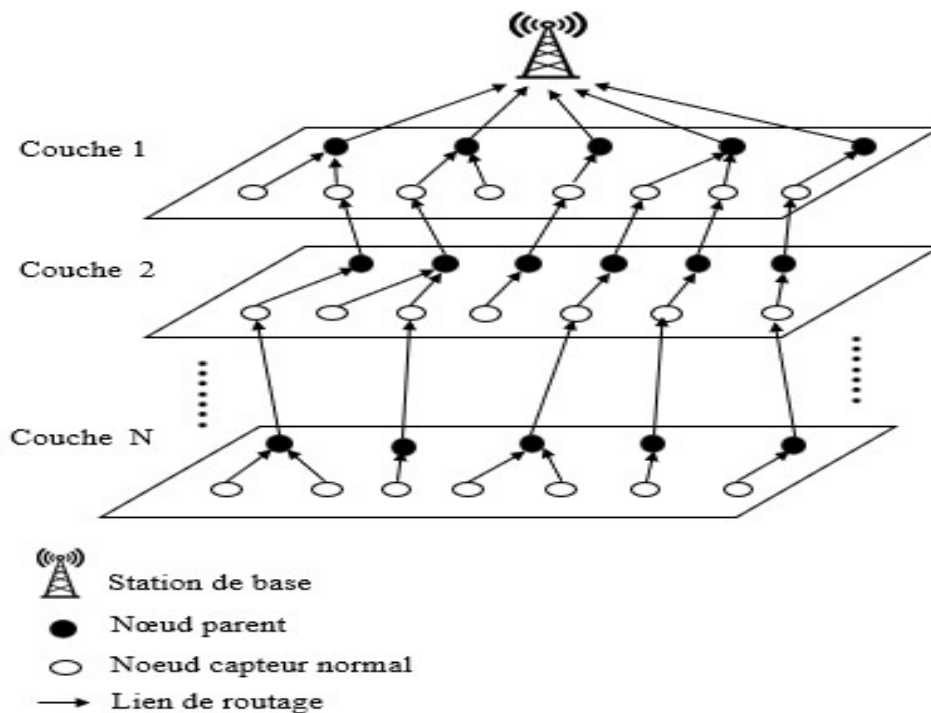


Figure 34: Le schéma d'hierarchisation en couches dans l'approche de routage proposée

4.4.2 La phase de communication

Lorsqu'un nœud doit transmettre une demande de route, il consulte d'abord sa table de routage pour voir si une entrée existe pour cette destination. Si aucune entrée n'existe pour cette destination spécifique, une procédure de découverte de route est lancée par un paquet RREQ qui sera transmis par chaque nœud intermédiaire au nœud suivant de sa couche avant d'être redirigé vers la couche supérieure de la hiérarchie jusqu'à ce qu'il atteigne sa destination. Chaque fois que le paquet RREQ est reçu par un nœud intermédiaire, le coût de la route est calculé et accumulé pendant le transfert du RREQ jusqu'à ce qu'il atteigne sa destination. Un champ appelé "*Min_Energy_Cons*" a été ajouté au format des paquets RREQ et RREP pour stocker la valeur minimale de l'énergie consommée par la route correspondante, ce paramètre sera combiné avec celui du nombre minimum de sauts pour calculer le coût des routes. Chaque fois que le paquet RREQ est reçu par un nœud intermédiaire, le coût de la route est calculé et accumulé pendant le transfert du RREQ jusqu'à ce qu'il atteigne la destination selon la formule suivante :

$$\text{Coût(Route)} = \text{Min} [\alpha * \sum_S^D (\text{Energie}_{\text{consommée}}) + \beta * (\text{Nombre_de_sauts})] \quad (12)$$

Où α and β sont des facteurs de poids avec : $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$ et $\alpha + \beta = 1$.

La destination choisit alors la route la plus économique et envoie un message de confirmation diffusé le long de la route. La connexion est établie dès réception de ce message par la source et la communication peut alors commencer.

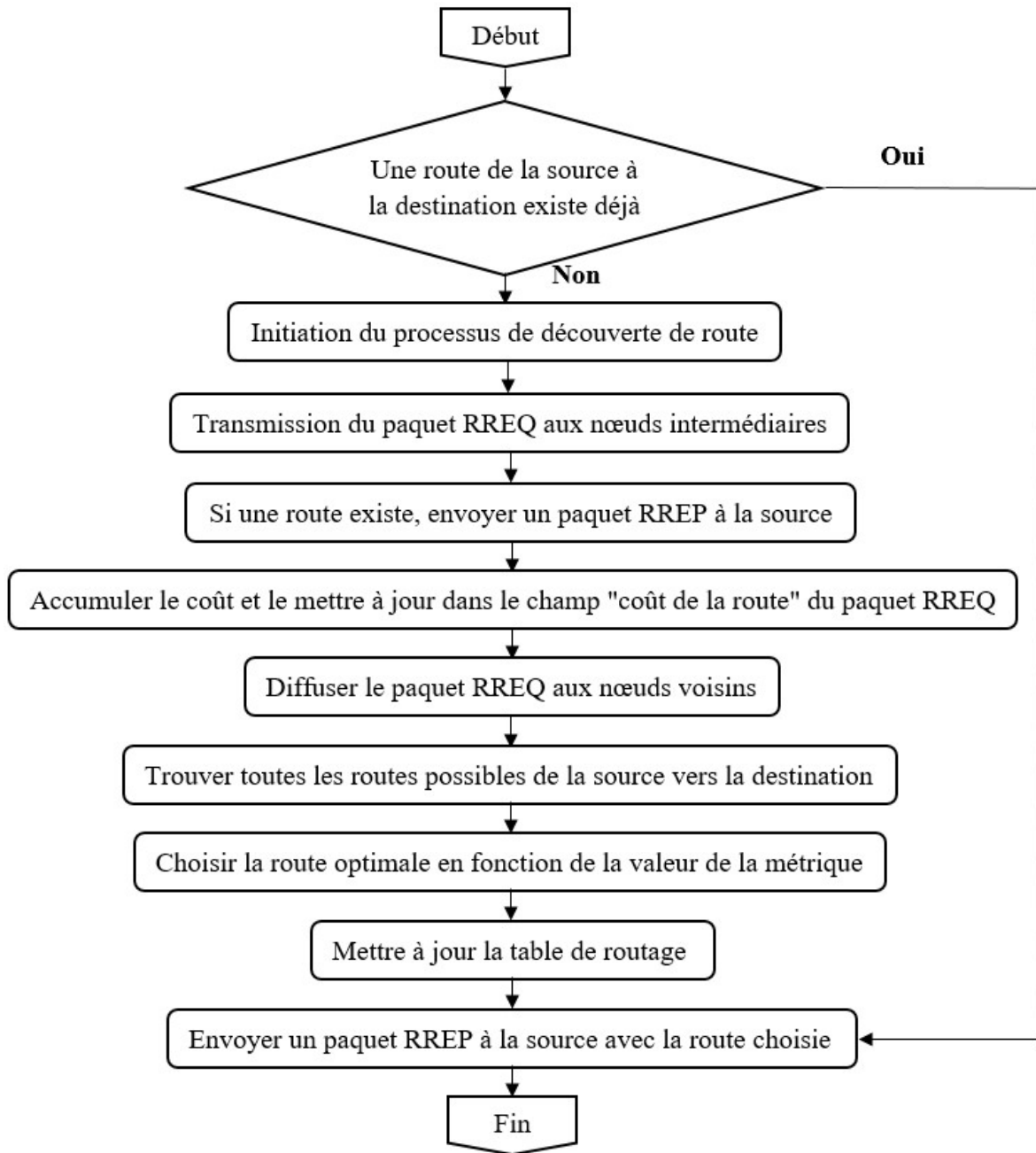


Figure 35: Organigramme de la phase de communication

Si après un certain temps, aucun message n'est reçu d'un nœud voisin, le lien en question est considéré comme défectueux. Ensuite, un message RERR (Route Error) est envoyé à la source et tous les nœuds intermédiaires marquent la route comme non valide et, après un certain temps, l'entrée correspondante est supprimée de leur table de routage.

4.4.3 Phase de maintenance de route

La route reliant un nœud source et un nœud destination par les entrées actives dans les tables de routage est appelée chemin actif. En cas d'erreur, la maintenance des routes peut être résumée dans les trois points suivants :

- Des messages HELLO périodiques pour détecter les ruptures de lien.
- Mise à jour des tables de routage en fonction du numéro de séquence.
- Si un nœud intermédiaire devient défaillant, un paquet RREP spécial est envoyé à la source pour réinitialiser le processus de découverte de la route.

Les messages HELLO sont utilisés pour maintenir les informations de connectivité. À chaque intervalle de temps (HELLO_interval), le nœud vérifie s'il a diffusé un message et si ce n'est pas le cas, il diffuse un message HELLO pour informer les voisins qu'il est toujours à portée radio. Lorsqu'il reçoit ce message, le nœud vérifie s'il dispose d'une entrée dans sa table de routage pour la mettre à jour; sinon, il rajoute ce nœud à la liste de ses voisins et rajoute ainsi l'entrée correspondante dans la table de routage.

4.4.4 La prise en compte de la qualité de service dans le protocole proposé

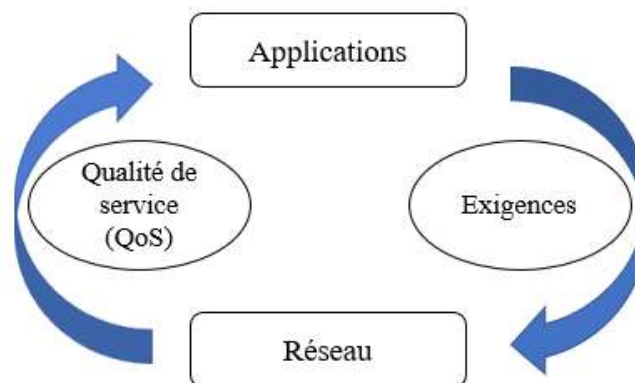


Figure 36: Modèle de qualité de service pour les RCSF [109]

Certains de ces défis liés à la qualité de service des réseaux de capteurs sont cités dans la littérature, tels que les contraintes de bande passante, les ressources limitées, les compromis énergie-délai, la redondance des données, les types de trafic multiples, le trafic déséquilibré, la scalabilité, les puits multiples, la dynamique du réseau, le bilan énergétique et la criticité des paquets.

Du point de vue réseau, l'objectif est de fournir le niveau de qualité de service requis tout en maximisant l'utilisation des ressources du réseau. Pour atteindre cet objectif, les exigences des applications de surveillance ont été analysées et les mécanismes de qualité de service réseau ont été déployés. Ces paramètres tels que le délai de transmission des paquets, la gigue, le taux de

livraison de paquets (PDR) et le débit sont les attributs de qualité de service au niveau du réseau pour les RSCF.

4.4.5 Environnement de simulation

Pour tester la performance de notre protocole de routage, nous avons simulé un réseau de capteurs en utilisant le simulateur NS 2.35 [110]

Bien que NS-2 puisse être compilé sur différentes plates-formes, nous avons choisi une plate-forme Linux pour cette thèse, car Linux offre un certain nombre d'outils de développement de programmation qui peuvent être utilisés avec le processus de simulation.

Est un simulateur d'événement discret et très utile pour l'analyse de la nature dynamique d'un réseau de communication, il est basé sur deux langages : un simulateur orienté objet écrit en C++ et un interpréteur OTcl (une extension orientée objet de Tcl). OTcl est utilisé pour exécuter les scripts de commande des utilisateurs, ces scripts peuvent être utilisés pour définir les topologies de réseau, les modules et leurs relations, le protocole qu'on souhaite implémenter et l'application à simuler, ainsi que la forme de sortie attendue, etc. Après simulation, le résultat peut être généré sous forme de texte ou d'animation. Pour interpréter ces résultats graphiquement et interactivement, des outils supplémentaires tels que NAM (Network AniMator) et XGraph sont utilisés. La (Figure 38) montre l'architecture de base du simulateur NS-2.

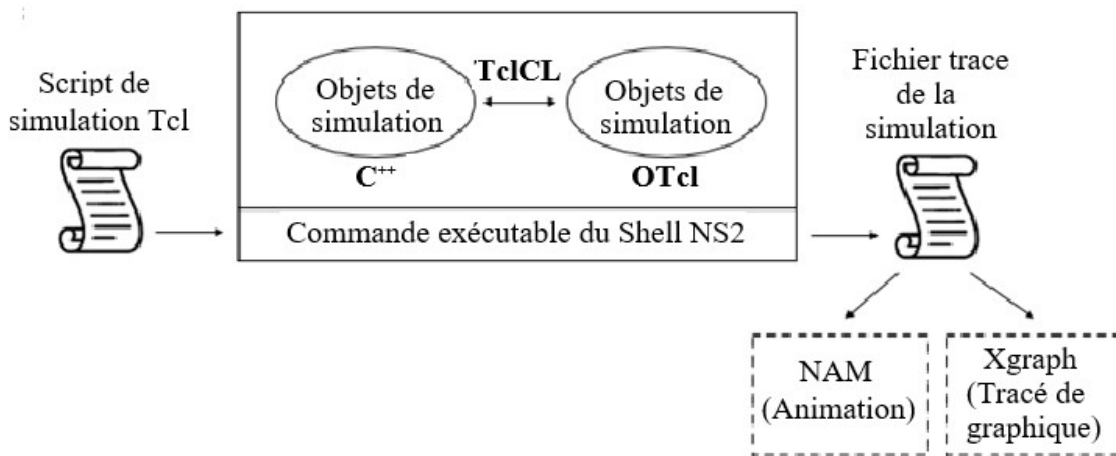


Figure 37: Architecture du simulateur NS-2[110]

Pour exécuter une simulation avec NS-2, l'utilisateur doit écrire le script de simulation dans OTCL, obtenir les résultats de simulation dans un fichier de trace de sortie, et analyser les résultats en utilisant la commande awk, les scripts Perl, ou tout autre programme d'analyse de trace disponible

Le simulateur NS-2 implémente les fonctionnalités suivantes :

- Techniques de gestion des files d'attente des routeurs DropTail, RED, CBQ,
- Simulation de réseaux sans fil :

- ✓ Développé par Sun Microsystems + UC Berkeley (Projet Daedalus).
- ✓ Terrestre (cellulaire, Ad hoc, GPRS, WLAN, BLUETOOTH), satellite.
- ✓ IEEE 802.11 peut être simulé, Mobile-IP, et les protocoles Ad hoc.

- Routage.
- Multidiffusion.
- Traçage des paquets sur tous les liens / liens spécifiques.
- Topologie du réseau.
- Flux de paquets.
- Applications - Telnet, FTP, Ping.

On distingue trois étapes principales dans le développement d'un scénario de simulation sous NS-2 :

- ✓ Étape 1 : conception de la simulation : il s'agit de la première étape de la simulation du réseau dans laquelle l'utilisateur doit déterminer le but de la simulation, le réseau à simuler et sa structure, les hypothèses à faire, les mesures de performance et le type de sortie attendu.
- ✓ Étape 2 : élaboration et simulation de fonctionnement : cette étape est l'implémentation de la première étape et se compose de deux phases :
 - Phase de construction du réseau : il s'agit d'une phase au cours de laquelle des composants de réseau réels tels que le protocole, les modèles, sont créés et conciliés en fonction de la première étape. Il y a aussi des événements différents comme le transfert de données, l'heure de début et de fin de la simulation, etc. sont programmés.
 - Phase de simulation : cette phase démarre la simulation selon la congrégation mentionnée dans la phase d'élaboration du réseau et exécute tous les événements programmés jusqu'à l'expiration du temps de simulation.
- ✓ Étape 3 : traitement post-simulation: la vérification de l'intégrité du programme et l'évaluation de la performance du réseau simulé constituent la tâche principale de cette étape.

Les deux premières étapes sont implémentées en utilisant les langages C++ et OTcl comme mentionné précédemment. L'étape 3 qui consiste à évaluer la performance du réseau simulé est également appelée traçage de paquets.

L'activité principale du traçage de paquets consiste à enregistrer les détails du flux de paquets lors d'une simulation, elle est classée en deux types : un traçage de paquets basé sur le texte et un traçage de paquets NAM.

4.4.5.1 Traçage de paquets à base de texte

Le fichier de trace (.tr) contient les traces d'événements qui peuvent être traitées ultérieurement pour comprendre les performances du réseau. Dans ces détails des paquets circulant sur le réseau,

les points de contrôle (par exemple, les nœuds et les files d'attente) sont enregistrés. Le seul fait d'avoir le fichier de trace ne serait pas suffisant à moins que des données significatives ne soient extraites de celui-ci. Dans la phase de post-analyse, l'utilisateur peut extraire les données qui l'intéressent et les analyser plus en détail selon les besoins.

Par exemple, le débit moyen peut être trouvé pour un lien en extrayant les colonnes respectives du fichier trace. Un autre exemple pourrait être le temps nécessaire pour atteindre la destination de chaque paquet qui pourrait être trouvé. Les deux langages les plus populaires sont AWK et PEARL.

4.4.5.2 Network Animator (NAM)

Un autre type de sortie est une sortie basée sur l'animation qui est créée à l'aide du NAM (Network Animator). Cette trace NAM enregistre les détails de la simulation dans un fichier texte et l'utilise pour lire la simulation sous forme d'animation en permettant de visualiser le mouvement des nœuds et leur interaction dans différentes conditions.

NAM fournit une interprétation visuelle de la topologie du réseau créée. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- ✓ Fournit une interprétation visuelle du réseau créé.
- ✓ Fournit une interface glisser-déposer pour créer des topologies.
- ✓ Peut être exécuté directement depuis un script Tcl.
- ✓ Présente des informations telles que le débit, le nombre de paquets sur chaque lien.
- ✓ Les commandes comprennent la lecture, l'arrêt, la pause, un contrôleur de vitesse d'affichage et une fonction de surveillance des paquets.

4.4.5.3 Les principaux paramètres utilisés dans la simulation des réseaux sans fil

Ci-dessous certains des paramètres utilisés dans la simulation des réseaux sans fil ainsi que leurs valeurs par défaut et disponibles :

- ✓ Protocole de transport: le protocole de transport utilisé par les nœuds capteurs. Les protocoles disponibles sont TCP et UDP (par défaut).
- ✓ Protocole de routage : le protocole de routage utilisé par les nœuds capteurs.
- ✓ Contrôle d'accès au support (MAC) : contrôle d'accès au support pour les nœuds capteurs. Puisqu'il s'agit d'une simulation de réseau de capteurs sans fil, IEEE 802.11 est le MAC disponible.
- ✓ Configuration de la couche liaison de données : la configuration par défaut de la couche de liaison NS-2 LL.
- ✓ Couche physique : deux options sont proposées, l'une simulant un nœud capteur Crossbow Mica2 (par défaut) et l'autre simulant une interface radio Lucent WaveLAN DSSS 914MHz.
- ✓ Configuration de l'antenne du nœud capteur.
- ✓ Modèle de propagation radio utilisé : quatre modèles sont disponibles : FreeSpace, Shadowing, ShadowingVis, TwoRayGround (par défaut).

- ✓ File d'attente de l'interface (IFQ) : huit modèles de files d'attente sont fournis : DropTail (par défaut), DropTail/XCP, RED, RED/Pushback, RED/RIO, Vq et XCP.
- ✓ IFQ Longueur du nombre de messages échangés à l'IFQ : l'utilisateur doit préciser cette valeur (50 messages par défaut).
- ✓ Taille du scénario: taille (en mètres) du scénario de simulation.
- ✓ Nom du fichier de trace.
- ✓ Options de traçage : des boutons radio sont utilisés pour définir le type d'informations qui doivent être stockées dans le fichier trace : TRACE-MAC, TRACE-ROUTE et TRACE-Agent. Par défaut, les trois options sont activées.

4.4.6 Simulation

Dans cette section, nous avons simulé l'algorithme proposé dans NS-2.35 et nous avons mentionné les détails de la mise en place de l'algorithme proposé et les résultats obtenus. Les métriques de performance sont calculées à partir des fichiers de trace à l'aide du programme AWK, les résultats de la simulation sont présentés sous forme de graphiques linéaires. Dans cette contribution, nous avons analysé le comportement et le rendement du réseau en termes des métriques de performance standard telles que : la consommation d'énergie, le délai de bout en bout et le ratio de livraison de paquets.

4.5 Hypothèses de simulation

Les hypothèses suivantes sont considérées pour le protocole proposé :

- Les capteurs et la station de base (le puits) sont tous stationnaires après le déploiement.
- Les nœuds capteurs sont répartis uniformément dans le champ du réseau avec un déploiement aléatoire.
- Les capteurs sont homogènes et ont les mêmes capacités.
- Les nœuds capteurs sont alimentés par batterie et ont donc une énergie limitée.
- Les nœuds capteurs peuvent calculer leur énergie résiduelle.
- Les liens sont symétriques, c'est-à-dire que la vitesse ou la quantité de données est la même dans les deux cas.
- Le nœud puits possède une capacité de calcul, de mémoire et d'alimentation illimitées.

4.6 Résultats de simulation

Dans cette section, nous évaluons la performance du protocole de routage proposé (EAODV-LC) à travers une comparaison avec les protocoles AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) et LCH (Layered Clustering Hierarchy Protocol) sur la base d'importantes métriques de performance à savoir: la consommation d'énergie, le délai de bout en bout et le taux de livraison des paquets (PDR). Nos simulations ont été effectuées sous NS-2.35, les résultats ont été reproduits dans des graphiques basés sur des fichiers de trace générés lors des simulations. La (**Table 6**) présente les paramètres de simulation.

Paramètres	Valeurs
Protocoles de routage	EAODV-IC; LCH; AODV
Taille du réseau	500 m*500 m
Nombre de noeuds capteurs	20-200
Energie initiale des nœuds capteurs	6J
Taille d'un paquet	500 octets
Portée de la transmission	25 m
Protocole MAC	802.11, 3 Mbps
α, β	0.5
E_{elec}	50 nJ/bit
E_{amp}	100 pJ/bit/m ²
Temps de simulation	60 mins
Protocole de transport	TCP

Table 6: Paramètres de simulation dans NS-2.35

4.6.1L'énergie dissipée dans le réseau

Cette métrique représente le taux d'énergie moyenne consommée par les nœuds capteurs pour assurer les fonctions du réseau (transmission, réception, l'écoute et le traitement). Le protocole de routage calcule la consommation d'énergie en fonction du modèle énergétique. Cette mesure indique l'efficacité d'un protocole dans le réseau.

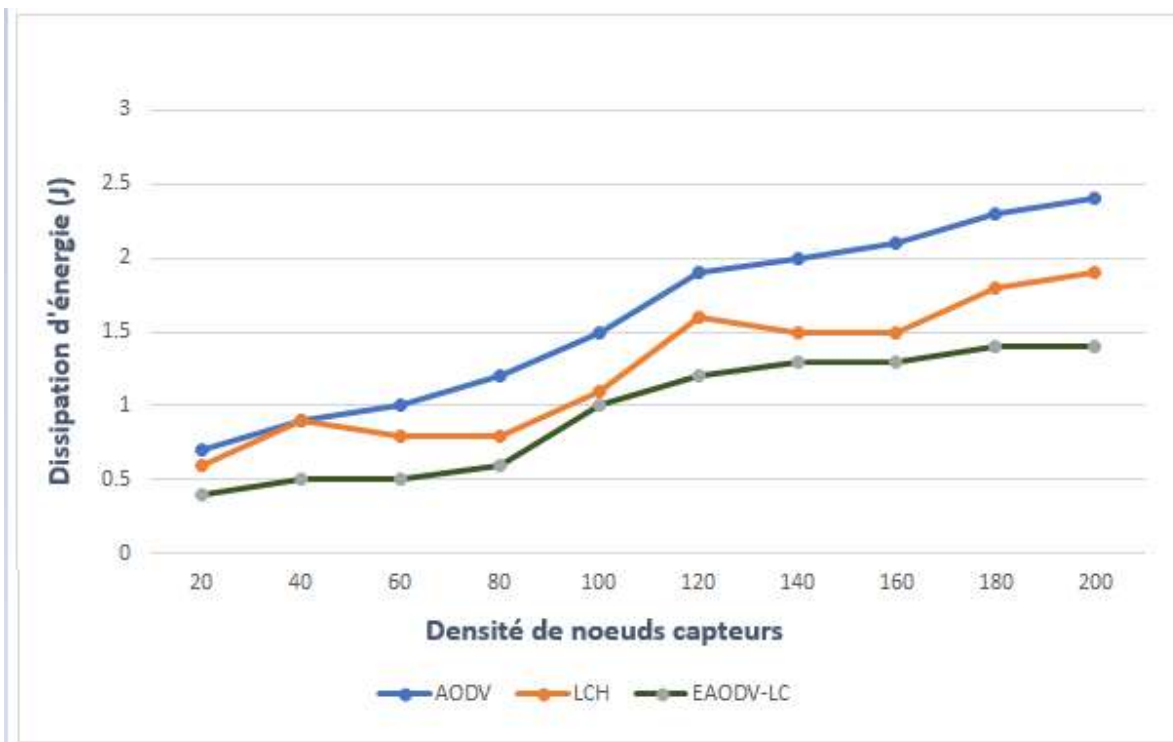


Figure 38: Évaluation de l'énergie dissipée dans le réseau

D'après la (Figure 39), on peut observer que, pour tous les protocoles, l'énergie diminue de manière proportionnelle avec l'augmentation du nombre de nœuds capteurs déployés dans le réseau. En outre, le protocole proposé (EAODV-LC) offre une meilleure conservation de l'énergie grâce au processus de sélection des routes et à la hiérarchisation du réseau en couches. Cette approche minimise la communication liée à la sauvegarde de la vue d'ensemble du réseau puisque chaque nœud capteur n'est préoccupé que par la structure de la couche à laquelle il appartient.

Le protocole AODV souffre de certaines ruptures de liaison dues à l'encombrement, ce qui implique la diffusion de plusieurs paquets de contrôle utilisés pour la réparation et l'entretien des routes, entraînant une augmentation de la consommation d'énergie. Alors que le protocole LCH ne garantit pas une distribution homogène des CH sur le réseau car il est basé sur l'exécution d'un protocole distribué de type LEACH dans chaque couche sans prendre en compte l'énergie des capteurs dans le processus d'élection des CH. De plus, les têtes de clusters distants communiquent directement avec le nœud de réception ce qui épuise rapidement l'énergie des nœuds dans les réseaux à grande échelle et augmente la consommation d'énergie dans le réseau.

4.6.2 Délai de bout en bout

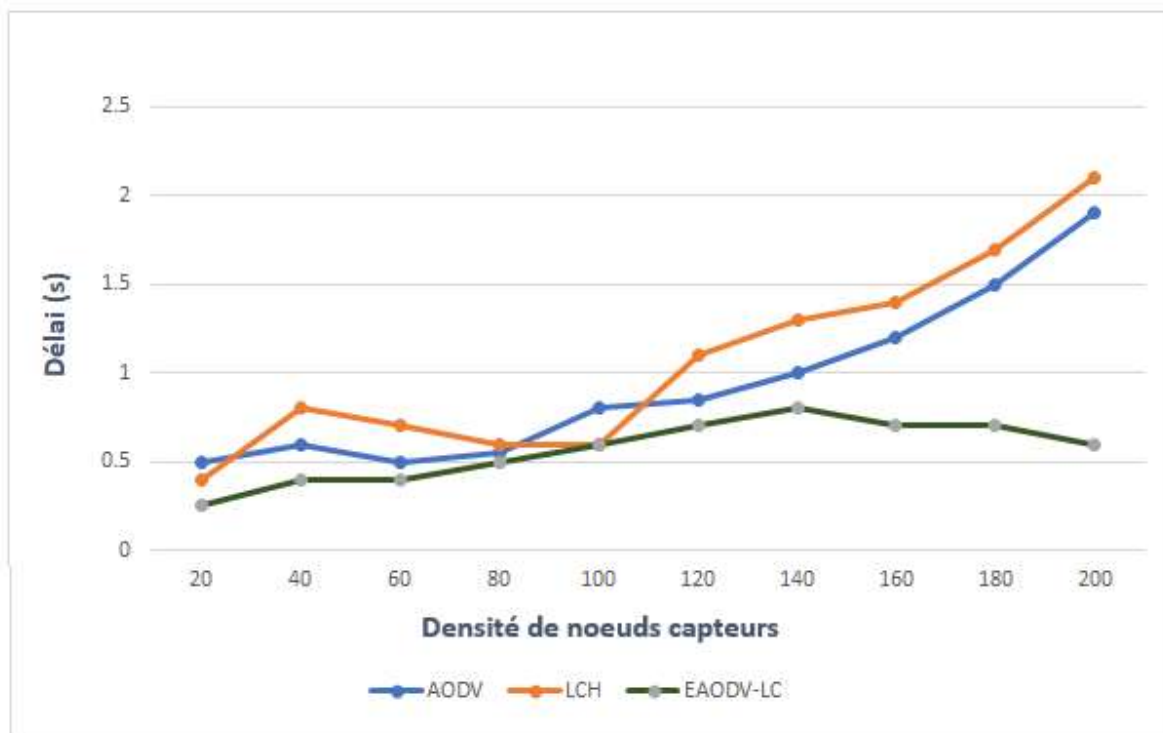


Figure 39: Évaluation du délai moyen de bout en bout

Lorsque le nombre de nœuds dans le réseau augmente, l'interférence augmente également, ce qui se résulte en un délai plus élevé.

Le protocole EAODV-LC peut atténuer efficacement le problème de la congestion dans laquelle l'augmentation du trafic (flux) provoque un ralentissement global des performances du réseau. Comme le montre la (**Figure 40**), le délai moyen du protocole EAODV-LC est toujours inférieur à celui des autres protocoles de routage, en effet, la structuration en couches du réseau dans le protocole proposé (EAODV-LC) réduit le délai puisque les données sont envoyées d'une couche inférieure à une couche supérieure de la hiérarchie dans la direction du nœud puits. Ainsi, elle favorise une distribution des routes sur le réseau contrairement au protocole AODV qui peut concentrer les routes autour de quelques nœuds du fait qu'il n'est basé que sur le nombre minimum de sauts dans la procédure de recherche de route.

4.6.3 Ratio de livraison des paquets

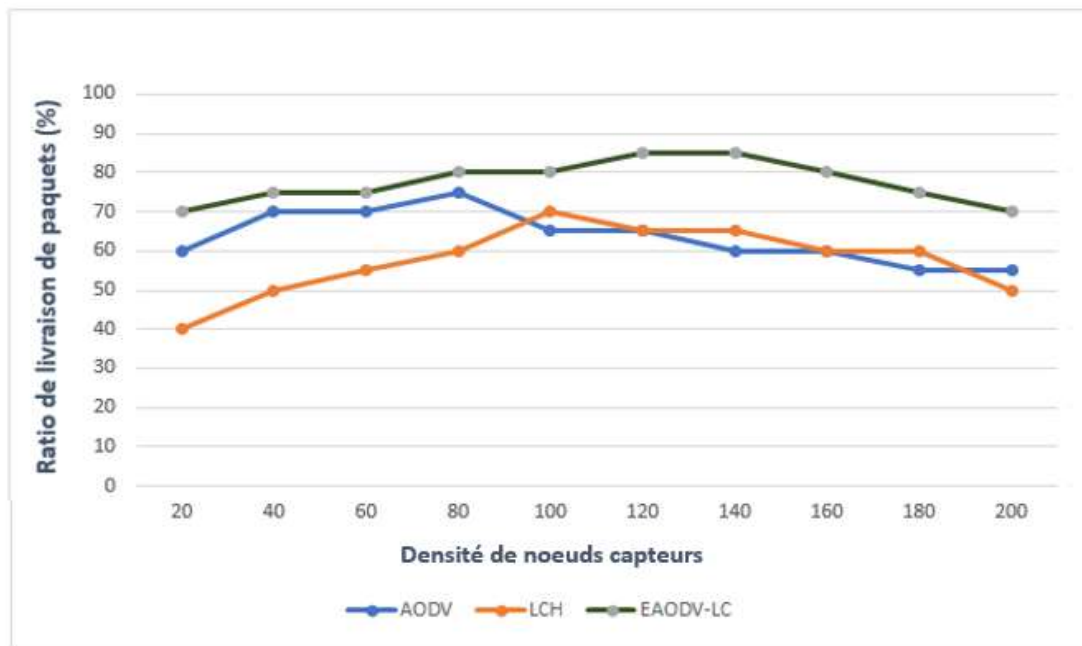


Figure 40: Évaluation du ratio de livraisons de paquets

Comme illustré dans la (Figure 41), notre protocole (EAODV-LC) assure une meilleure distribution des routes que les protocoles AODV et LCH, ce qui a un impact positif sur le ratio livraison de paquets (PDR). Il est démontré par la simulation que la métrique proposée pour le processus de sélection des routes offre de meilleures performances car elle sélectionne toujours les chemins les plus courts avec une consommation d'énergie minimale, ce qui a pour effet de prolonger la durée de vie du réseau et d'améliorer le ratio de livraison des paquets en réduisant la probabilité de rupture de liens. De plus, l'organisation du réseau en couches limite la génération de paquets RREP par de nombreux nœuds intermédiaires ce qui répartit très bien les routes et réduit la charge du réseau.

En résumé, les résultats obtenus montrent l'efficacité de l'approche de routage proposée qui bénéficie de deux concepts clés : la hiérarchisation du réseau en couches et la métrique utilisée dans le processus de découverte des routes qui inclut le paramètre énergétique ainsi que les sauts minimums. Cela permet de contrôler le rayon de transmission et nécessite moins de puissance de transmission. De plus, L'amélioration du taux de livraison des paquets apporte également des avantages secondaires tels que la réduction des délais et de la consommation d'énergie.

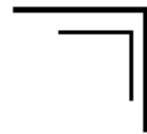
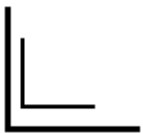
4.7 Conclusion

A travers cette contribution, nous avons fourni une modélisation, une analyse et une conception d'un protocole de routage pour les applications de RCSF minimisant l'énergie consommée du réseau. La nouvelle approche de routage proposée étend le protocole AODV de base en adoptant une métrique qui combine l'énergie et le nombre de sauts dans le processus de découverte de route ainsi que la hiérarchisation du réseau en plusieurs couches, ce protocole permet également de

découvrir des routes et de les maintenir avec un minimum de surcharge de contrôle en utilisant un mécanisme de répartition de la charge. Les résultats de la simulation ont montré que le protocole EAODV-LC améliore considérablement les métriques de performance par rapport aux autres protocoles testés et garantit aussi une meilleure optimisation des ressources et une amélioration de l'équilibrage des charges.

Chapitre V : Contribution 3: Conception d'un protocole basé sur le clustering pour la minimisation de l'énergie consommée dans les RCSF

Ce cinquième chapitre présente la troisième contribution que nous avons apportée dans le cadre de cette Thèse pour répondre à la problématique de consommation d'énergie dans les RCSF



5 Contribution 3 : Conception d'un protocole de routage basé sur le clustering pour la minimisation de l'énergie consommée dans les RCSF (EEHCBRP)

5.1 Introduction

Les RCSF ont un potentiel énorme pour améliorer l'efficacité de nombreux systèmes. Le principal défi dans la mise en place et le bon fonctionnement des RCSF est d'augmenter la durée de vie du réseau en minimisant la consommation d'énergie. De nombreux travaux de recherche sur les RCSF se sont concentrés sur les protocoles de communication. Ceux-ci sont généralement nécessaires pour maximiser la durée de vie du réseau et améliorer sa scalabilité afin de s'adapter aux grands nombres de capteurs. De plus, étant donné que l'accès au support/médium est l'un des principaux consommateurs d'énergie des capteurs, des mécanismes de contrôle d'accès au support (MAC) économes en énergie sont également explorés pour minimiser la dissipation d'énergie. Deux autres défis majeurs sont de savoir comment organiser les nœuds dans le réseau et quels rôles leur attribuer. Pour faire face à tous les défis que nous avons mentionnés, le clustering a été trouvé la technique efficace pour améliorer la durée de vie des réseaux RCSF. Les applications RCSF introduisent des exigences de qualité de service (QoS) pour les réseaux de capteurs, ces exigences couvrent une large catégorie d'attributs allant de la qualité de service du réseau à la latence, la gigue, le débit et la perte de paquets.

Notre troisième contribution se concentre sur la proposition d'un protocole de routage hiérarchique pour une bonne gestion de communication tout en minimisant considérablement la consommation d'énergie et en la conciliant avec les exigences de l'application dans l'objectif d'optimiser le comportement du réseau en termes de métriques de performance. Dans le cadre de travail nous nous focalisons sur:

1. La modélisation du réseau et les indicateurs de performance importants, tels que le trafic de routage, le débit, les délais, la consommation d'énergie.
2. L'analyse de la performance résultante du protocole au moyen d'expériences et de simulations.
3. La minimisation de la consommation totale d'énergie du réseau, par conséquent, le problème d'optimisation est le suivant :

$$\text{Min } E_{totale}(\text{Réseau})$$

Cette conception de protocole de routage vise la minimisation de la consommation d'énergie du réseau, tout en respectant les exigences de fiabilité et de délai de la couche application. La conception repose sur la modélisation analytique du comportement du protocole.

5.2 Étude détaillée des protocoles de routage efficaces en énergie

Le routage hiérarchique représente l'une des stratégies les plus efficaces pour améliorer l'efficacité énergétique et parvenir à une auto-organisation du réseau. Au cours des dernières années, l'intérêt pour la hiérarchisation du réseau a donné lieu à un important corpus de travaux de recherche. Dans ce mode de routage un CH (chef de cluster) peut être élu par les nœuds capteurs d'un cluster ou pré-assigné par le concepteur du réseau et peut aussi être l'un des capteurs ou un nœud plus riche en ressources. L'appartenance à un cluster d'un nœud peut également être fixe ou variable. Dans cette section, nous passerons en revue les protocoles de routage hiérarchiques les plus connus dans la littérature et qui sont efficaces sur le plan énergétique :

5.2.1 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical)

LEACH est le protocole le plus aspirant pour de nombreux autres protocoles de clustering et le plus largement utilisé dans les RCSF [111], il représente la combinaison d'une architecture basée sur des clusters (chefs de cluster et membres de cluster) et d'un routage à sauts multiples utilisé pour la communication inter-cluster entre les chefs de cluster et les stations de base. Les résultats de simulation prouvent que le routage à sauts multiples consomme moins d'énergie que le routage direct.

LEACH réduit les problèmes d'agrégation de données en utilisant une fusion de données locale basée sur la compression de la quantité de données recueillies par les chefs des clusters (CHs) avant de les envoyer à la station de base. Tous les capteurs forment un réseau auto-organisé en partageant le rôle du chef de groupe au moins une fois. Les CHs sont les principaux responsables de l'envoi des données recueillies par les capteurs à la station de base.

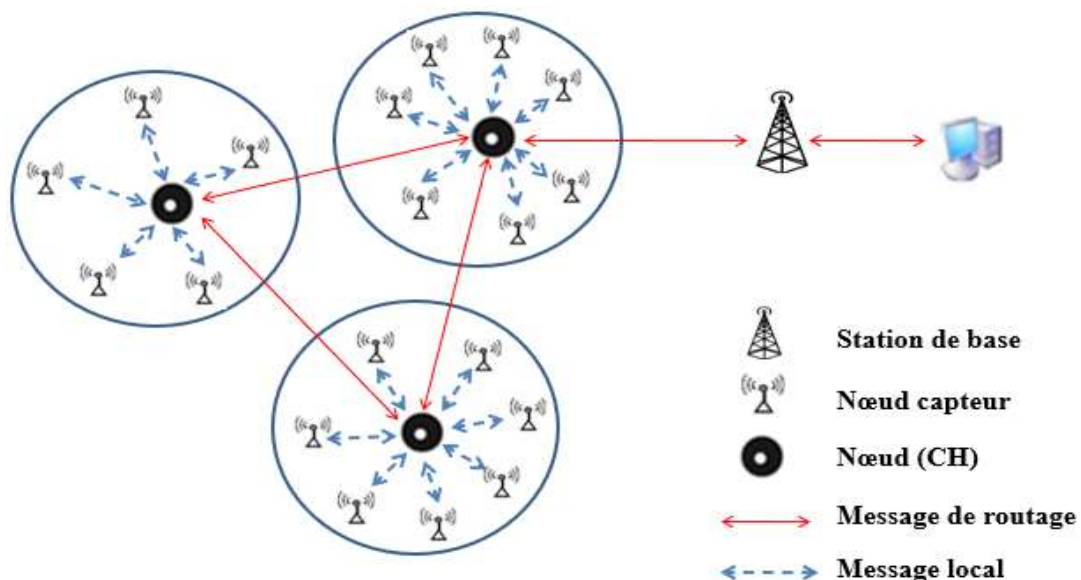


Figure 41: Schéma de base du protocole LEACH

Le protocole LEACH essaie d'équilibrer la dissipation d'énergie à l'intérieur du réseau et augmente sa durée de vie, son fonctionnement est divisé en deux étapes : la phase de mise en place (setup phase) et la phase d'équilibre (steady-state) [63]:

- **Phase de mise en service :**

LEACH est basé sur la formation de clusters dans lesquels les CHs élus collectent et agrègent les données saisies par les nœuds membres de leur cluster pour les transmettre ensuite à la station de base, un CH joue son rôle de chef de cluster pendant une période de temps appelée "round". Au début de chaque round, chaque nœud du réseau détermine s'il veut être un CH en calculant un nombre entre 0 et 1 ; si ce nombre est inférieur à un seuil $T(n)$ le nœud devient CH, le seuil $T(n)$ est exprimé par la relation :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p \lceil \text{rmod}(\frac{1}{p}) \rceil} & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (13)$$

Avec p : le pourcentage des nœuds CHs dans le réseau ; r : le numéro du cycle en cours ; G : le nombre de nœuds qui n'ont pas été sélectionnés comme CH dans les $1/p$ cycles précédents. Une fois que les clusters sont formés, chaque CH envoie ses identifiants aux nœuds du réseau par le biais du protocole CSMA et attribue à chaque nœud membre de son cluster un intervalle de temps pendant lequel il peut envoyer ses données en se basant sur l'approche TDMA.

Dans la phase de mise en service, tous les capteurs du réseau se regroupent dans des clusters en échangeant des messages les uns avec les autres. Les nœuds CHs envoient des messages aux autres capteurs restants qui choisissent de rejoindre les clusters formés par les CHs, en fonction de l'intensité du signal des messages reçus, puis ils envoient un signal de réponse indiquant qu'ils acceptent de s'y joindre. Ainsi, la première phase du protocole est terminée. Le chef de cluster peut décider du nombre optimal de membres du groupe qu'il peut gérer ou dont il a besoin.

Avant d'entrer dans la phase d'équilibre, certains paramètres sont pris en compte, tels que la topologie du réseau et les coûts relatifs de communication. Une technique de contrôle d'accès TDMA est appliquée à tous les membres au sein d'un cluster pour envoyer leurs messages au CH qui se charge par la suite de les transmettre vers la station de base.

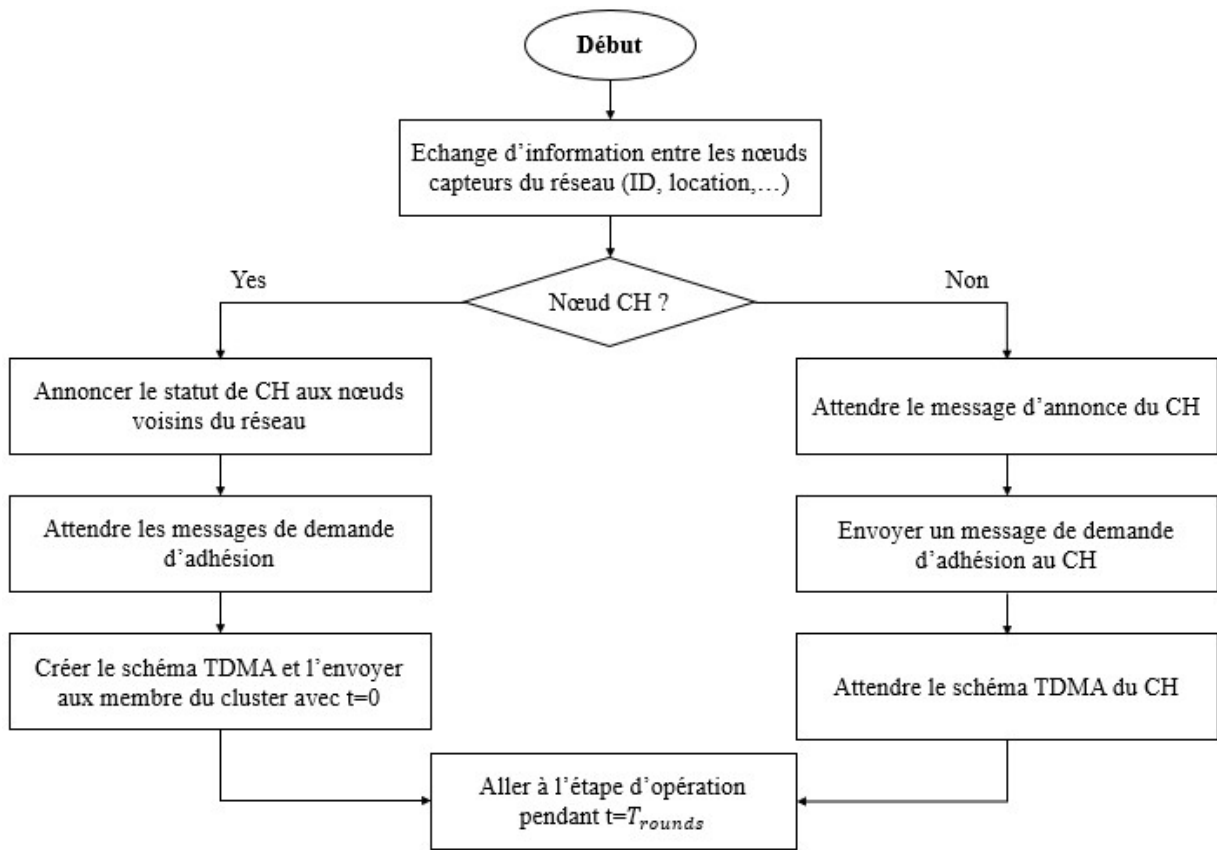


Figure 42: organigramme de la phase de mise en service dans le protocole LEACH

- **Phase d'état d'équilibre :**

Dès qu'un chef de cluster est sélectionné au sein d'un cluster, tous les autres nœuds membres envoient les données collectées au CH en respectant les intervalles TDMA attribués. Ensuite, le CH transmet ces données dans un format compressé à la station de base. Une fois cette phase terminée et les données envoyées, le processus d'élection des CHs recommence à nouveau pour chaque cluster. En résumé, on peut dire qu'un nouveau round (phases de mise en service et phase d'équilibre) commence avec la fin de la transmission des données au puits. Cette sélection alternative de CHs dans le réseau effectuée par les capteurs de manière auto-organisée, aide à diminuer l'énergie consommée et à répartir la charge sur l'ensemble des nœuds capteurs du réseau.

Dans le cas où les CHs ne sont pas proches de la station de base, ils envoient les données compressées aux CHs voisins en utilisant un routage multi-sauts. De plus, le nombre des nœuds membres requis par un CH est limité car un grand nombre de membres peut créer une surcharge de trafic au niveau du réseau.

Le protocole LEACH réduit l'énergie de communication dissipée par les CHs et les membres des clusters et garantit une faible latence car tous les membres du cluster transfèrent les données détectées au CH qui se charge par la suite de les transmettre au puits et une bonne scalabilité car les nœuds peuvent facilement s'adapter aux changements comme de nouveaux déploiements de

nœuds dans le réseau. De plus, la force de ce protocole réside dans son mécanisme de rotation des CHs et d'agrégation de données. En revanche, LEACH n'offre aucune garantie quant à l'emplacement et/ou au nombre de nœuds têtes de cluster CHs) à chaque round. Par conséquent, l'utilisation d'un algorithme de regroupement centralisé produirait de meilleurs résultats. Cependant, le problème de la détermination du nombre optimal de têtes de clusters est un problème NP-complet.

Le seul facteur qui est ignoré dans LEACH est la qualité du service, par exemple, si un CH ne parvient pas à transmettre les données, il n'y aura pas d'autres chemins pour renvoyer le paquet de données perdu. La topologie du réseau (la structure de la formation des clusters) change à chaque fois qu'une transmission de données est achevée avec le puits ou la station de base. De plus, LEACH suppose une distribution homogène des nœuds capteurs dans une zone donnée et n'assure pas une distribution uniforme des CHs dans le réseau.

5.2.2 PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

Le protocole de routage PEGASIS a été proposé pour les réseaux de capteurs comme amélioration du protocole LEACH [111]. Ce protocole nécessite la formation d'une chaîne et est réalisée en deux étapes : la construction de la chaîne et la collecte des données. L'idée clé du protocole PEGASIS est qu'il utilise tous les nœuds pour transmettre ou recevoir les données en se basant sur ceux les plus proches. Ceci est obtenu par la formation d'une chaîne parmi tous les meilleurs nœuds qui se trouvent à une distance d'un saut les uns des autres en direction de la station de base.

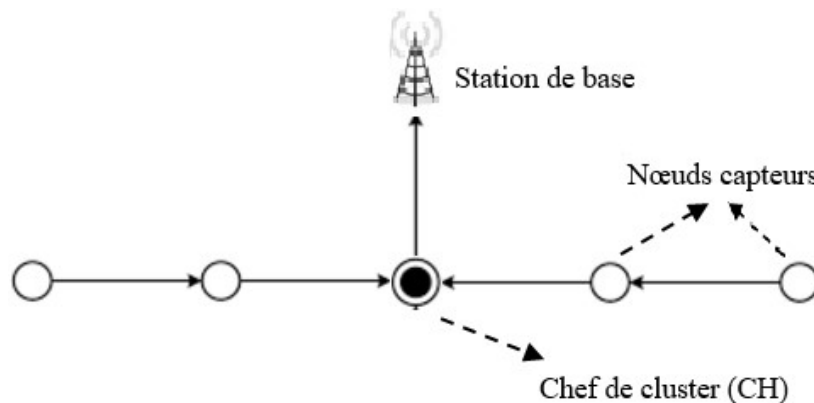


Figure 43: Construction de chaîne dans PEGASIS

Comme le montre la (Figure 44), tous les nœuds qui collectent les données les fusionnent avec les données reçues par le nœud voisin dans un seul paquet et les transmettent au voisin le plus proche jusqu'à ce qu'elles atteignent la station de base. Chaque nœud du réseau se relaie en tant que leader de la chaîne créée. De cette manière, la surcharge de la formation dynamique des clusters et la quantité moyenne d'énergie dépensée par chaque nœud sont réduites. PEGASIS part du principe que tous les nœuds avec des niveaux d'énergie variables ou faibles peuvent être compensés afin de calculer le coût énergétique des transmissions avec l'énergie restante qu'il leur reste. Ce n'est pas nécessaire pour un nœud dans le réseau d'avoir une vision globale sur son voisinage directe, la

station de base peut intervenir pour former la chaîne et les nœuds peuvent déterminer les nœuds voisins en envoyant un signal. En fonction de l'intensité de ce signal, les nœuds ajustent leur radio de telle sorte à n'entendre que les voisins les plus proches dans le réseau.

Le protocole PEGASIS réduit la transmission des données et est efficace en termes de l'énergie consommée en raison de la structure de la chaîne formée pour atteindre la station de base qui est beaucoup plus économe en énergie que la formation de clusters dans LEACH, ce qui favorise la répartition de la charge énergétique uniformément dans le réseau. En revanche, le délai est augmenté pour les nœuds distants en raison d'une seule chaîne et peut réduire les performances et la latence est élevée car si le nœud le plus éloigné ou le premier nœud de la chaîne possède des informations importantes qui doivent être transmises immédiatement, ces données doivent passer par la chaîne entière pour atteindre la station de base. Le protocole PEGASIS s'adapte facilement au déploiement de nouveaux nœuds dans la chaîne car il ne s'agit pas d'un chemin de transmission fixe. S'il trouve un nouveau nœud qui économise beaucoup plus d'énergie, il l'ajoute pendant la formation de la chaîne.

Bien que son approche en matière d'économie d'énergie soit meilleure, elle ne met pas l'accent sur les facteurs liés à la qualité du service car le protocole connaît un délai élevé dans la transmission des données. Le processus de fusion de données dans un seul paquet lors de l'acheminement peut causer une perte de données en cas d'instabilité du réseau ou de défaillance d'un nœud ou d'une liaison. De plus, PEGASIS ne résiste pas à une distribution inégale du trafic pour tous les nœuds qui ne sont pas à un saut unique, il doit créer une structure multi-sauts pour ajouter de tels nœuds.

5.2.3 HEED (Hybrid Energy Efficient Distributed Clustering)

Le protocole de routage HEED représente un algorithme de clustering multi-sauts pour les réseaux de capteurs sans fil qui se concentre sur un clustering efficace en sélectionnant correctement les têtes de cluster (CHs) [112]. Ce protocole vise à diviser le réseau en clusters à saut unique où les CH sont élus selon deux métriques : l'énergie résiduelle et le coût des communications intra-cluster. Chaque nœud calcule sa probabilité de devenir CH selon la formule suivante :

$$CH_{prob} = C_{prob} * (E_{Res} / E_{Max}) \quad (14)$$

Où C_{prob} désigne le pourcentage initial des CHs (5%), utilisé pour limiter les déclarations initiales de CHs et E_{Res} représente l'énergie restante du nœud et E_{Max} son énergie initiale. CH_{prob} est toujours supérieure à un seuil p_{min} inversement proportionnel à E_{Max} .

L'algorithme de HEED est exécuté en deux phases :

- **Phase répétitive :**

Chaque nœud du réseau et après plusieurs itérations choisit son CH en fonction du coût de transmission le plus bas, s'il n'y a pas de CH présenté, il se déclare CH et annonce son statut aux autres nœuds du réseau et double son CH_{prob} à chaque nouvelle itération jusqu'à ce qu'il devienne égal à 1 afin d'assurer la convergence de l'algorithme, ainsi un nœud du réseau peut être présenté sous deux états : "état provisoire" si $CH_{prob} < 1$ ou "état final" si $CH_{prob} = 1$.

- **Phase finale :**

Dans cette phase, chaque nœud décide de son statut dans le réseau, soit il est CH, soit il est membre du cluster. HEED est un protocole de clustering entièrement distribuée et fournit une distribution uniforme des CHs sur l'ensemble du réseau. Les communications sont de type multi sauts entre les CHs et la station de base. Cependant, il génère plus de CHs que le nombre attendu, ce qui diminue la durée de vie du réseau.

5.3 Le protocole de routage proposé

5.3.1 Objectif et caractéristiques du protocole proposé

La conception d'un réseau de capteurs sans fils pour des applications de surveillance doit tenir compte d'un grand nombre de facteurs qui garantissent une mise en œuvre correcte [38]:

Favorisation de la communication à sauts multiples: la transmission directe des données consomme toujours plus d'énergie que la communication à sauts multiples. En communication directe, le nœud capteur doit maximiser la puissance de transmission radio, ce qui augmente directement la consommation d'énergie à chaque nœud. Le protocole de routage doit tenir compte de cette donnée pour améliorer l'efficacité énergétique.

Utilisation d'un protocole MAC soucieux de l'énergie: le nœud capteur détecte l'environnement, génère les données et les transmet au nœud puits. Lorsque les nœuds capteurs ne détectent et ne transmettent aucun signal, ils doivent passer en mode veille. Par conséquent, un protocole MAC approprié est nécessaire pour la conservation de l'énergie dans le réseau, d'où l'utilisation d'un accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) dans le schéma de routage proposé.

Équilibrage de charge: dans l'environnement distribué où chaque nœud capteur doit s'auto-gérer, l'information sur l'énergie résiduelle joue un rôle vital. En utilisant le modèle énergétique, chaque nœud calcule son énergie résiduelle. Le protocole de routage doit gérer la charge entre les nœuds capteurs de manière à ce que plus de charges soient assignées à un nœud riche en énergie et à réduire la charge de fonctionnement des nœuds ayant moins d'énergie résiduelle. La bonne technique d'équilibrage de charge améliore l'efficacité énergétique.

Outre ces exigences, il est important de concevoir un protocole de communication efficace qui répond aux exigences de l'application et optimise la consommation d'énergie du réseau. Les exigences des applications sont un ensemble d'attributs de service mesurables imposés par les applications en termes, par exemple, d'équité, de délai, de gigue, de largeur de bande disponible et de perte de paquets. L'objectif de l'approche de conception proposée est d'optimiser le comportement du réseau en tenant compte des contraintes imposées par l'application au lieu de simplement améliorer la fiabilité, le délai ou l'efficacité énergétique sans contraintes.

Auto-configuration et reconfiguration : ceci est essentiel pour l'amélioration de la durée de vie des réseaux sans surveillance dans un environnement dynamique et contraint par l'énergie. Des mécanismes de mise à jour et de reconfiguration devraient prendre place lorsque les nœuds épuisent leur énergie ou quittent le réseau. Une caractéristique importante pour chaque protocole de routage

est d'adapter la topologie qui change très rapidement et en même temps, de maintenir les fonctions réseau.

5.3.2 Description du protocole proposé

Notre algorithme de routage hiérarchique vise à former des clusters interconnectés par l'échange de messages de découverte entre les nœuds et à utiliser une technique TDMA pour mettre en place un mécanisme de veille pour les capteurs afin de prolonger la durée de vie du réseau. Il intègre également une méthode d'agrégation de données basée sur des communications multi-sauts intra-cluster et inter-cluster. Le diagramme de flux de la (Figure 45) montre la description du processus du premier round dans notre algorithme de clustering.

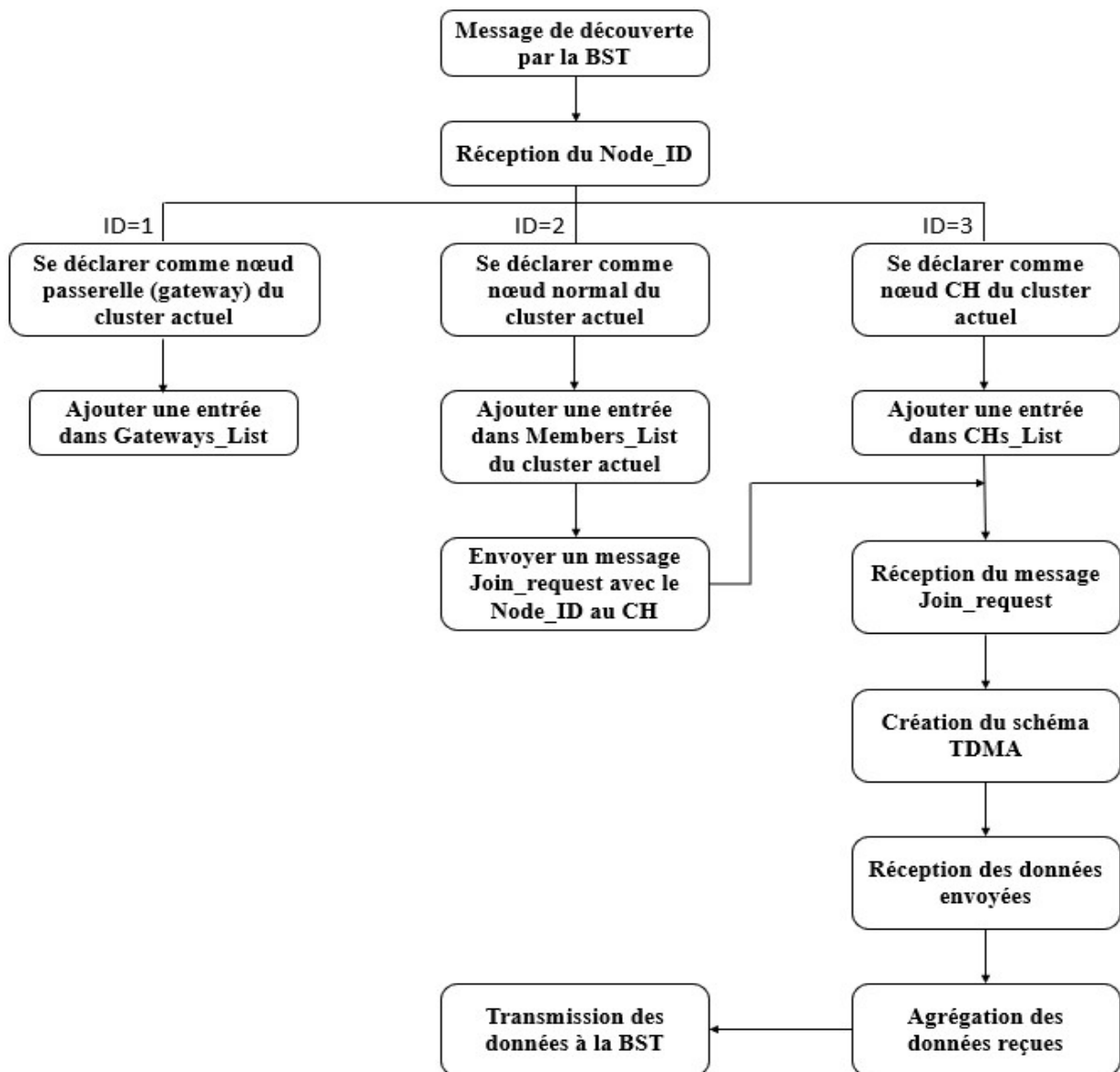


Figure 44: Organigramme de la phase de mise en place dans notre protocole de routage (EEHCBRP)

5.3.2.1 Phase d'initialisation

L'exploitation d'un réseau de capteurs commence par la phase de mise en place des clusters, au cours de laquelle les clusters sont formés, suivie de la phase de transmission des données, au cours de laquelle les nœuds d'un cluster transmettront les données collectées au nœud élu comme tête du cluster qui les agrège et les relaie.

Au début, les nœuds capteurs sont en mode d'écoute, les clusters seront définis par une technique de diffusion contrôlée par la station de base qui diffuse un message de découverte sur la zone couverte contenant un identifiant de nœud fixé à la valeur "0" et incrémenté à chaque fois par le nœud récepteur avant de l'envoyer à ses voisins, ainsi qu'un identifiant de cluster incrémenté uniquement par les nœuds CH, ces identifiants sont manipulés de manière à construire progressivement des clusters à 2-sauts avec à chaque fois le nœud CH comme centre.

5.3.2.2 Phase de clustering

Il est bien connu que dans un réseau de capteurs multi-sauts, l'élection du CH affecte la consommation d'énergie dans chaque méthode de clustering, notre approche proposée tend à réduire cet effet en utilisant une méthode de clustering efficace. Le pseudo code de la phase de construction des clusters est décrit ci-dessous :

Déclaration:

Soit n : un simple nœud du réseau

Soit N : le nombre de capteurs dans le réseau

Soit: $Discovery_MessageID$: l'identifiant du message de découverte diffusé dans le réseau, il est initié à la valeur "0"

Soit: $Increment_Flag$: le flag qui contrôle les valeurs des " $DiscoveryMessageID$ ", il est initié à la valeur "actif"

Début:

Pour ($n \in N, n=1, \dots, N$)

($Increment_Flag=actif$)

{

1. Ecouter le $DiscoveryMessage$ de la part de la BST dont la valeur initiale est fixée à 0

2. Si ($DiscoveryMessageID=0$) devenir un nœud passerelle (gateway node) et ajouter une entrée dans la liste : $Gateways_List$

3. Incrémenter the $DiscoveryMessageID$ avant de le transférer au nœud voisin

4. Si ($DiscoveryMessageID= (1,2)$) devenir un nœud membre du cluster en cours de formation et ajouter une entrée dans la liste $Members_List$

5. Si (*DiscoveryMessageID=3*) devenir un nœud CH, ajouter une entrée dans la liste *CHs_List* et désactiver le flag (*Increment_flag=desactive*) pour que le *DiscoveryMessageID* soit decrementé à chaque réception jusqu'à ce qu'il redevienne = 0

Le nœud CH envoie aussi un *ClusterID=1* à incrémenter seulement par le nœud CH suivant

6. Quand le (*DiscoveryMessageID=0*) Activer le flag (*Increment_Flag=active*) et Répéter le processus (ligne 2 à 5) jusqu'à $n=N$

Si (nœud singleton) rejoindre le cluster avec le dernier ID connu *ClusterID*

}

Fin.

Pseudo code de la phase de clustering dans le protocole (EEHCBRP)

À l'issue de cette phase, trois listes sont constituées :

- *Members_List* : définie dans chaque CH, elle contient l'ensemble des nœuds membres d'un cluster.
- *Gateways_List* : définie dans chaque CH, donne une vue d'ensemble des clusters voisins.
- *CHs_List* : définie dans la BST, liste les CHs du réseau.

Une fois les clusters formés, les CHs reçoivent des données de nœuds simples et créent des tables TDMA basées sur le nombre de nœuds qui forment les clusters. Les nœuds d'un cluster ne communiquent pas directement avec le nœud puits, ils doivent transmettre les données collectées au nœud chef de leur cluster (CH) en respectant les intervalles de temps (slots), ce dernier qui agrègera les données reçues et les transmettra à la station de base. Cela minimise ainsi la consommation d'énergie et le nombre de messages communiqués à la station de base ainsi que le nombre de nœuds actifs en communication ce qui se résulte en une durée de vie prolongée du réseau. Lorsque toutes les données sont reçues, elles sont compressées par les CHs et transmises à la station de base.

Lorsque les données atteignent la station de base, un paquet d'accusé de réception est renvoyé au chef du cluster. Si ce dernier ne reçoit pas cet accusé de réception de la station de base, il transmet à nouveau les données.

5.3.2.3 Schéma TDMA et gestion des routes

Une fois les clusters formés, la station de base utilise un *Msg_BTS* pour attribuer un code de transmission MAC à chaque cluster afin de limiter les collisions inter-clusters, à leur tour les CHs attribuent un code de transmission MAC à chaque nœud membre afin de limiter les collisions intra-clusters. En outre, dans chaque cluster, une liste de tous les nœuds de passerelle vers les clusters voisins est établie et sera utilisée pour le routage inter-clusters.

Une route est définie par le triplet (*SourceID*, *DestinationID*, coût). Les communications intra-cluster sont exploitées simultanément dans tous les clusters du réseau. Pour le processus de

communication inter-clusters, chaque CH diffuse un message qui contient son ID, l'énergie résiduelle, le nombre des noeuds membres de son cluster ainsi que la distance à la station de base.

5.3.2.4 Réélection de CH et la métrique utilisée

À chaque nouveau round, l'élection de la nouvelle CH ne passe pas par la station de base mais plutôt par l'ancien CH selon trois éléments :

- Le niveau d'énergie de la nouvelle CH.
- Densité des noeuds à deux sauts.
- Distance de l'ancien CH.

Chaque noeud calcule sa probabilité d'être un CH en utilisant la métrique suivante :

$$P(CH) = [\alpha * (Energy - résiduelle) + \beta * (2 - Densité) + \gamma * (Distance du dernier CH)] \quad (15)$$

Où la 2-densité fait référence au nombre de noeuds voisins à deux sauts en se basant sur la formule suivante de calcul de la k-densité d'un noeud $u \in V$:

$$\rho_k(u) = \frac{|e=(v,w) \in E \mid w \in \{u, \Gamma_k(u)\} \text{ et } v \in \Gamma_k(u)|}{\delta_k(u)} \quad (16)$$

Avec :

$\Gamma_k(u)$: Voisinage du noeud u à k-sauts.

$\delta_k(u)$: Degré du noeud u à k-sauts.

La 2-densité représente donc le rapport entre le nombre de liens entre le noeud u et ses voisins à 2- sauts plus le nombre de liens entre ces voisins et son 2-degré (le 2-degré d'un noeud est égal au nombre de ses voisins à 2-sauts).

La distance entre deux noeuds (i) et (j) est désignée par :

$$Distance_{(i,j)}(t) = \sqrt{(X_i(t) - X_j(t))^2 + (Y_i(t) - Y_j(t))^2} \quad (17)$$

Le choix des valeurs des paramètres (α, β, γ) dépend des besoins de l'application avec : $\alpha + \beta + \gamma = 1$

Cette approche permet d'éviter la consommation d'énergie en réduisant l'énergie du clustering et d'assurer la rotation des CHs, ce qui contribue à prolonger la durée de vie du réseau.

5.3.2.5 Modèle d'agrégation de données

Notre méthode d'agrégation est basée sur l'approche Data centric utilisée pour résoudre le problème d'implosion des données qui caractérise les réseaux de capteurs, ce qui permettant le traitement de données redondantes au moment de la transmission sur le réseau [67].

Dans chaque cluster, les nœuds capteurs d'un niveau (N) agrègent les données provenant des nœuds de niveau inférieur (N-1). De plus, un processus d'agrégation de données est effectué entre les CHs lors des communications inter-clusters assurées par les nœuds de passerelle.

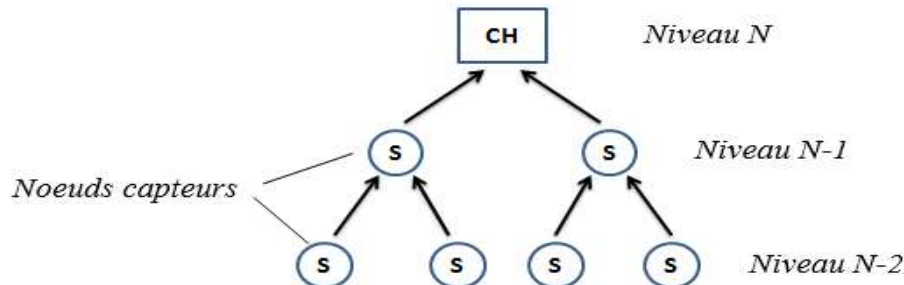


Figure 45: Processus d'agrégation des données dans chaque cluster dans le protocole EEHCBRP

L'agrégation des données à plusieurs niveaux représente un moyen efficace de réduire la quantité d'informations communiquées et donc de diminuer la consommation d'énergie et d'améliorer la durée de vie du réseau.

5.3.2.6 Paquets échangés dans le protocole EEHCBRP

Notre protocole utilise trois types de paquets : (HelloPacket) pour découvrir les nœuds voisins et établir des chemins, (ClusterConstructPacket) utilisé dans la phase de construction des clusters et dans l'élection des CH, (DataPacket) qui contient les données à transmettre dans le réseau. Selon le type de paquet, différentes informations sont utilisées dans notre protocole :

- Identifiant du nœud source, son CH et ses coordonnées (x, y).
- Identifiant du parent du nœud source.
- Métrique calculée du nœud source.
- Nombre de sauts entre le nœud source et son CH.
- Liste des voisins du nœud source et de leurs coordonnées.
- Liste des adresses des clusters voisins.
- Identifiant du nœud de destination et son ClusterID (DestinationClusterID).
- NextHopID : identifiant du nœud NextHop.
- Données : données transmises.
- TTL : durée de vie du paquet.

5.3.2.7 Le modèle d'énergie utilisé

Nous avons adopté un modèle simple pour la dissipation de l'énergie du module radio où l'émetteur dissipe l'énergie pour faire fonctionner la radio électronique et l'amplificateur de puissance, et le récepteur dissipe l'énergie pour faire fonctionner la radio électronique.

Le même modèle de consommation d'énergie dans les RCSF que nous avons décrit dans la contribution précédente a été utilisé dans la conception du protocole proposé dans cette contribution.

5.4 Simulations et résultats

Dans cette partie, nous comparons notre protocole de routage (EEHCBRP) avec les protocoles: LEACH, PEGASIS et HEED, et nous présentons les résultats de notre simulation basée sur l'évaluation des mesures du niveau d'énergie, du débit et du ratio de livraison des paquets.

5.4.1 Paramètres de simulation

Dans notre simulation, nous distribuons les nœuds capteurs dans le champ de déploiement avec une densité de déploiement suffisante pour assurer la connectivité sur le réseau, les nœuds sont homogènes et possèdent le même rayon de transmission et peuvent envoyer leurs données périodiquement. Nos simulations ont été effectuées dans MATLAB, la (Table 7) énumère les paramètres de simulation.

Paramètres	Valeurs
Zone de simulation	100 m * 100 m
E_0 (Energy initiale)	0,5 Joules
E_{elec} (L'énergie consommée dans le circuit électronique)	50 nJ/bit
E_{fs} (L'énergie consommée par l'amplificateur)	10 pJ/bit/m ²
Location de la station de base	(X=0 m ; Y= 0 m)
Nombre de noeuds	100
Portée de detection	5 m
Portée de transmission	50 m
Taille d'un message	2000 bits
Bande passante	5000 bits/sec
Taille d'un paquet de contrôle	250 bits
Vitesse de transmission des données	100 bits/sec

Table 7: Paramètres de simulation dans Matlab

5.4.2 Analyse des résultats de simulation

Dans cette partie, nous présentons nos résultats de simulation et nous comparons les performances de notre protocole de routage de clustering avec celles des protocoles de clustering étudiés.

5.4.2.1 Energie totale consommée

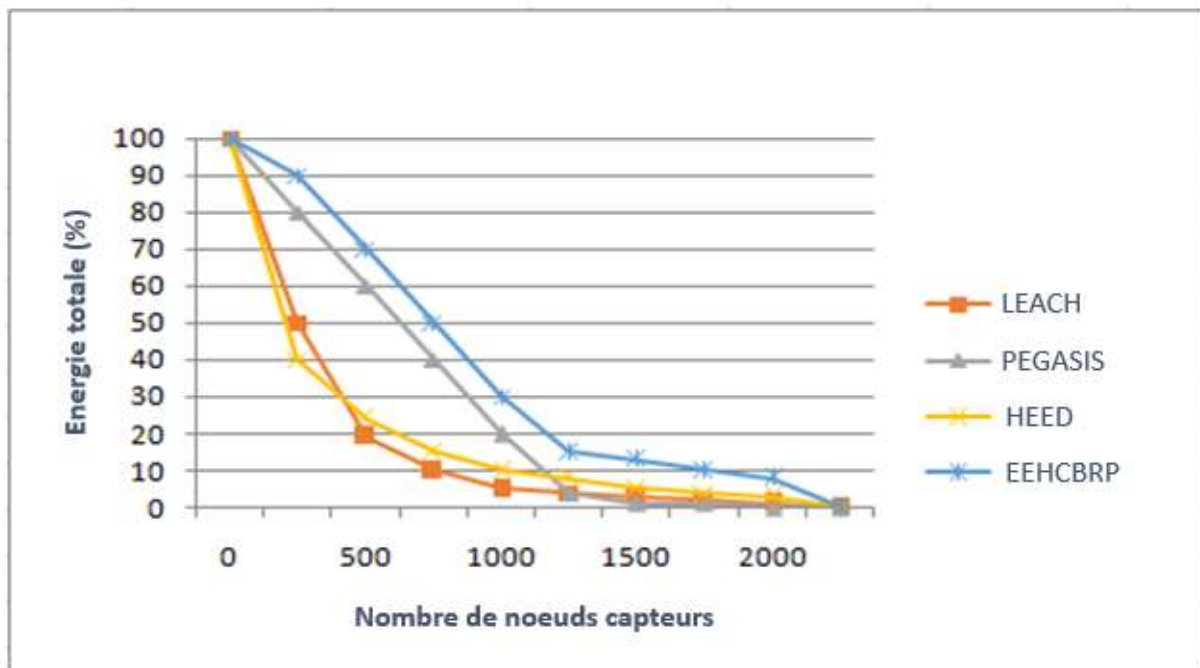


Figure 46: Évaluation de l'énergie totale consommée dans notre protocole Vs LEACH, PEGASIS et HEED

L'énergie totale consommée dans les protocoles de routage étudiés est illustrée dans la (**Figure 47**), cette énergie est présentée par la somme des énergies résiduelles de tous les nœuds du réseau, la rotation du rôle de CH sur tous les nœuds du cluster permet d'équilibrer la consommation d'énergie du cluster, mais dans le même temps elle génère une surconsommation d'énergie puisque chaque rotation de CH nécessite une phase de diffusion pour informer les nœuds sur le nouveau CH.

PEGASIS n'utilise qu'une seule transmission vers la station de base par round et réduit les coûts généraux de contrôle, ce qui améliore ses performances. Dans LEACH, la capacité à communiquer avec le puits par l'intermédiaire de n'importe quel nœud du réseau nécessite une consommation d'énergie considérable de la part des nœuds distants, de sorte que l'agrégation des données est centrée au niveau des CHs, ce qui en fait les maillons faibles du réseau. PEGASIS considère que tous les nœuds du réseau peuvent atteindre le puits, ce qui nécessite une transmission ajustable avec une surcharge énergétique importante.

La (**Figure 47**) montre également que la diminution de l'énergie dans notre protocole (EEHCBRP) est beaucoup plus lente que dans les autres protocoles (LEACH, PEGASIS et HEED) car il sélectionne les nœuds CHs en fonction de l'énergie résiduelle et de l'énergie minimale du CH précédent plutôt qu'en fonction d'une probabilité aléatoire, de plus, le protocole proposé consomme moins de paquets de contrôle et répartit la charge entre les nœuds capteurs ce qui prolonge la durée de vie du réseau.

5.4.2.2 Débit

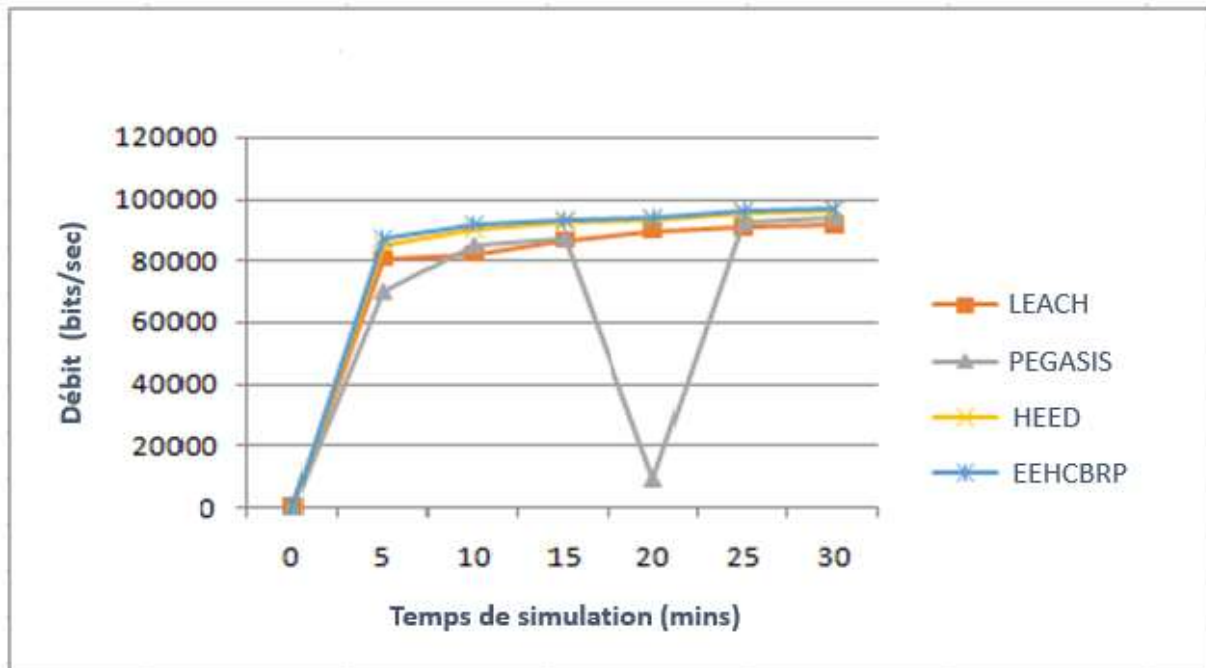


Figure 47: Évaluation du débit dans notre protocole Vs LEACH, PEGASIS et HEED.

Comme on peut le voir sur la (**Figure 48**), notre protocole a un débit efficace par rapport aux autres protocoles de routage simulés. Comme notre protocole (EEHCBRP) est exécuté en coopération entre tous les nœuds du réseau, chaque nœud décide indépendamment de son rôle dans le réseau, ce qui garantit une meilleure répartition de la consommation d'énergie. De plus, l'utilisation du routage multi-sauts garantit un compromis entre la taille des clusters et le nombre de clusters dans le réseau ce qui assure l'équilibre énergétique.

5.4.2.3 Ratio de livraison de paquets

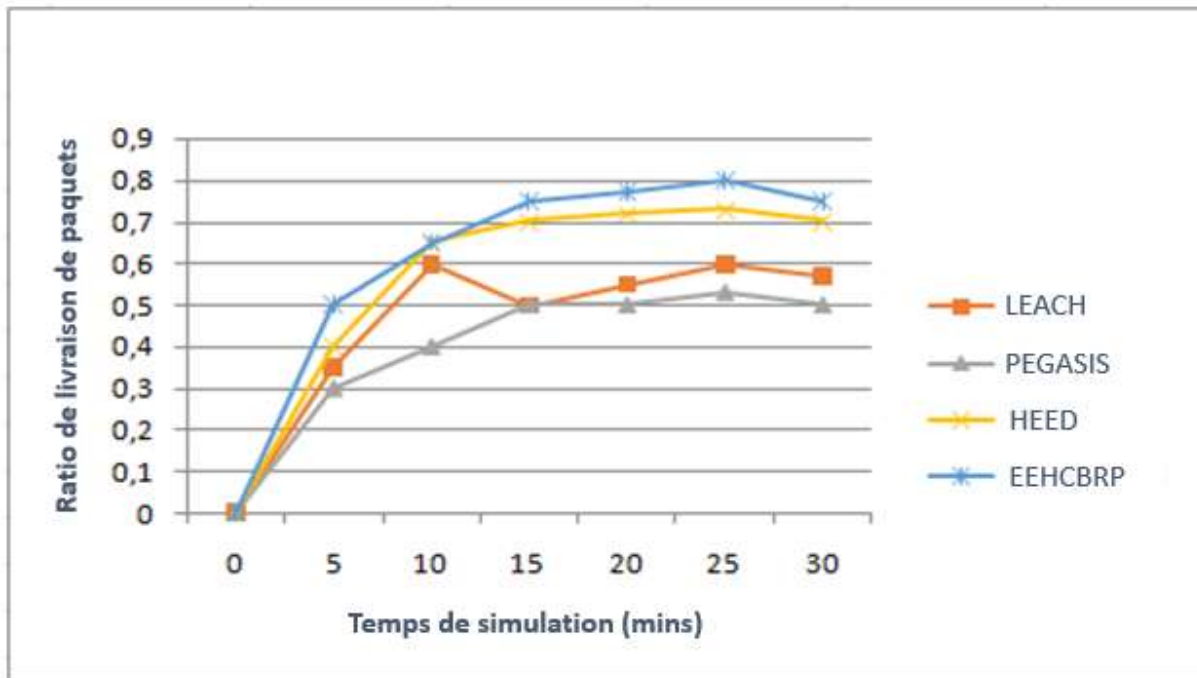


Figure 48: Évaluation du ratio de livraison de paquets dans notre protocole Vs LEACH, PEGASIS et HEED

Dans LEACH, la consommation d'énergie est partagée entre tous les nœuds et l'utilisation des techniques TDMA / CDMA permet une hiérarchie et un regroupement à plusieurs niveaux, ce qui permet d'économiser plus d'énergie.

Le protocole PEGASIS tente d'éliminer les surcharges causées par la formation dynamique de grappes dans LEACH, mais la longueur de la chaîne formée dans le protocole PEGASIS peut considérablement augmenter le temps de livraison des données et le seul nœud autorisé à communiquer avec la station de base peut devenir un goulot d'étranglement au sein du réseau.

La (**Figure 49**) montre que notre protocole (EEHCBRP) offre un meilleur rapport de livraison de paquets grâce à sa capacité à trouver rapidement le saut suivant avec une distance de transmission minimale par rapport aux autres systèmes de routage

Le protocole de routage basé sur les clusters proposé dans cette contribution apporte une réponse aux problèmes rencontrés dans le RCSF, en particulier celui de la consommation d'énergie qui a été le défi dans ce domaine. En se basant sur l'identification des sources de difficultés dont souffrent d'autres protocoles de routage hiérarchique par une analyse des performances, le protocole proposé bénéficie de deux concepts clés : notre processus de découverte de nœuds et la limitation du rayon de transmission qui évite les collisions et nécessite moins de puissance de transmission.

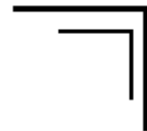
5.5 Conclusion

Les RCSF représentent la fusion de deux pôles informatiques modernes: les systèmes embarqués et les communications sans fil. Ils doivent garantir une bonne qualité de service et intégrer des mécanismes et des techniques permettant d'économiser l'énergie afin de prolonger la durée de vie de l'ensemble du réseau et notamment pendant la phase d'acheminement des données. Dans cette contribution, nous avons proposé un nouveau protocole de routage efficace en énergie basé sur la technique de clustering du réseau. Ce protocole a été implémenté et a fait l'objet d'une évaluation expérimentale à travers une comparaison avec les protocoles standard efficaces en énergie existants en termes de consommation d'énergie, de débit et de taux de livraison de paquets. Les résultats analytiques et expérimentaux montrent que le protocole proposé permet d'atteindre une performance supérieure quant aux attributs de qualité de service considérés et répond aux exigences et aux contraintes de déploiement des RCSF tout en assurant une bonne répartition de la charge, prolongeant ainsi la durée de vie du réseau.

Dans le cadre de nos futurs travaux, nous avons l'intention de développer notre protocole pour garantir son efficacité avec d'autres paramètres en prenant en considération davantage de spécifications des RCSF; nous améliorerons également son adaptation rapide aux changements topologiques et paramétriques et aborderons des questions telles que la qualité de service (QoS) pour atteindre la plus grande efficacité en matière de consommation d'énergie.

Chapitre VI : Conclusions et perspectives

Ce sixième chapitre présente les conclusions tirées à travers les contributions que nous avons apportées dans le cadre de cette Thèse et discute les éventuelles perspectives



Conclusion générale

Les progrès des communications sans fil et des systèmes micro-électromécaniques ont permis le développement des réseaux de capteurs sans fil, ce qui a favorisé l'émergence d'une multitude d'applications dans divers domaines comme l'agriculture, la supervision des activités sanitaires et les systèmes de transport. Cependant, en raison de la limitation d'énergie des capteurs alimentés par batterie, ces applications sont toujours confrontées à un problème énergétique majeur qui empêche leur adoption à grande échelle. Dans cette thèse, nous avons contribué à relever ce défi par plusieurs contributions. Nous avons développé de nouveaux schémas de routage pour améliorer l'efficacité énergétique des RCSF et nous avons évalué leurs performances par le biais de simulations approfondies.

La première partie de cette thèse a été consacrée aux RCSF généraux. Nous avons commencé par une étude complète de l'état de l'art des environnements sans fil et par un examen complet des mécanismes existants en matière d'efficacité énergétique conçus pour les réseaux de capteurs sans fil. Puis, nous avons présenté les différentes contributions de cette thèse où nous avons effectué d'abord une étude comparative avancée entre les protocoles de routages Ad hoc, ensuite nous avons proposé deux protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil, le premier est basé sur le protocole AODV et utilise une technique d'hiérarchisation du réseau en couches et une métrique de routage efficace en énergie, et le deuxième est basé sur la technique du clustering et sur une métrique d'élection du nœud CH reposant sur le calcul de l'énergie résiduelle, de la densité à deux sauts et de la distance de l'ancien CH. En se basant sur des simulations proches de l'environnement réel, nous avons montré que les protocoles de routage proposés peuvent réduire considérablement la consommation totale d'énergie du réseau par rapport aux algorithmes existants augmentant ainsi la durée de vie du réseau. Il a été aussi observé que la surcharge des paquets de contrôle pour la découverte et la maintenance des routes, le taux de transmission des données et la latence de bout en bout ont été réduits. Grâce à ces contributions, cette thèse a fait progresser l'état de l'art dans les réseaux de capteurs sans fil en termes de l'efficacité énergétique et des solutions de routage de données.

Perspectives

Les propositions de recherche issues de cette thèse ont ouvert plusieurs pistes de recherche prometteuses, qui peuvent faire l'objet de recherches plus poussées. Toutefois, il y a certaines limites à ce travail qui peuvent être améliorées à l'avenir :

- ✓ Les changements de routes dus à la mobilité des nœuds capteurs ou à la congestion du réseau ne sont pas rares dans les applications de réseaux de capteurs sans fil, ils peuvent également entraîner la transmission de paquets de données redondants par l'expéditeur. Une implémentation des protocoles proposés dans un environnement mobile pourrait être utile pour évaluer plus en détail sa performance pour d'autres applications.

- ✓ Comme autre orientation future possible, il pourrait être très intéressant d'examiner la combinaison du nombre optimal de nœuds puits et de transmissions à sauts multiples afin de trouver un compromis entre la consommation d'énergie et la latence ou de couvrir des zones éparpillées ou sans connexion.
- ✓ Une autre direction possible qui pourrait être prise en considération est le choix d'un sous-ensemble de nœuds qui peuvent couvrir la zone cible, à savoir la désactivation des nœuds redondants qui couvrent la même zone.
- ✓ Les schémas proposés portent essentiellement sur l'efficacité énergétique dans le protocole de routage et au niveau de la couche MAC peuvent être étendus à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans d'autres niveaux.
- ✓ L'exigence de sécurité est également un domaine de recherche émergent au sein des RCSF. Un mécanisme de sécurité léger, nécessitant peu de puissance et moins de coûts informatiques, doit être développé pour assurer un routage sécurisé.
- ✓ Il serait aussi intéressant de mettre en œuvre les techniques proposées dans un véritable environnement de déploiement de capteurs.
- ✓ Une importante direction de recherche devrait retenir l'attention des chercheurs, à savoir la conception de protocoles de routage pour les champs de capteurs tridimensionnels (3D). Bien que la plupart des travaux de recherche sur les RCSF aient pris en compte les paramètres bidimensionnels (2D), où les capteurs sont simulés dans un champ planaire, il existe quelques cas où la présomption 2D n'est pas raisonnable et où l'utilisation d'une configuration 3D devient un besoin.
- ✓ Enfin, dans le cadre de travaux futurs, nous envisageons de considérer des règles de décision au niveau des capteurs pour décider s'il faut ou non envoyer les données. Par exemple, nous pourrions intégrer des priorités en matière de données.

REFERENCES

- [1] “Concepts de base des réseaux sans fil — documentation ZigBee 0.1.” <https://zigbee.readthedocs.io/fr/latest/reseaux-sans-fil.html> (accessed Oct. 02, 2020).
- [2] “Wireless Sensor Networks - an overview | ScienceDirect Topics.” <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/wireless-sensor-networks> (accessed Oct. 02, 2020).
- [3] G. Han, J. Jiang, L. Shu, J. Niu, and H. C. Chao, “Management and applications of trust in Wireless Sensor Networks: A survey,” *J. Comput. Syst. Sci.*, vol. 80, no. 3, pp. 602–617, 2014, doi: 10.1016/j.jcss.2013.06.014.
- [4] A. K. Singh, S. K. Mishra, and S. Dixit, “Energy efficiency in wireless sensor networks: Cooperative MIMO-OFDM,” *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 524, no. December, pp. 147–154, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-2685-1_16.
- [5] B. Abdessamed and K. Salaheddine, “Memoire Online - à l'état de l'art sur les réseaux de

- capteurs sans fil - Salheddine Kabou,” 2010. <https://www.memoireonline.com/02/12/5433/tat-de-lart-sur-les-reseaux-de-capteurs-sans-fil.html> (accessed Jun. 22, 2020).
- [6] P. Hua, X. Liu, J. Yu, N. Dang, and X. Zhang, “Energy-efficient adaptive slice-based secure data aggregation scheme in WSN,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 129, pp. 188–193, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.03.033.
- [7] J. Luo, J. Hu, D. Wu, and R. Li, “Opportunistic routing algorithm for relay node selection in wireless sensor networks,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 11, no. 1, pp. 112–121, Feb. 2015, doi: 10.1109/TII.2014.2374071.
- [8] C. Samara, E. Karapistoli, and A. A. Economides, “Performance comparison of MANET routing protocols based on real-life scenarios,” *Int. Congr. Ultra Mod. Telecommun. Control Syst. Work.*, no. mis 1021, pp. 870–877, 2012, doi: 10.1109/ICUMT.2012.6459784.
- [9] I. 802.11, “IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks- Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” *IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007)*, vol. 11, pp. 1–2793, 2012, doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6178212.
- [10] S. Mukherjee and G. P. Biswas, “Networking for IoT and applications using existing communication technology,” *Egypt. Informatics J.*, vol. 19, no. 2, pp. 107–127, 2018, doi: 10.1016/j.eij.2017.11.002.
- [11] V. C. Gungor, B. Lu, and G. P. Hancke, “Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 10, pp. 3557–3564, Oct. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2039455.
- [12] V. Shah, R. Patel, and R. Nayak, “Short Range Inter-satellite Link for Data Transfer and Ranging using IEEE802.11n,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 164, no. 1, pp. 23–25, Apr. 2017, doi: 10.5120/ijca2017913561.
- [13] A. Moussaoui and A. Boukereum, “A survey of routing protocols based on link-stability in mobile ad hoc networks,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 47, pp. 1–10, 2015, doi: 10.1016/j.jnca.2014.09.007.
- [14] J.-D. Abdulai, “Probabilistic route discovery for Wireless Mobile Ad Hoc Networks (MANETs),” *Work. Found. Mob.*, no. April, pp. 63–72, 2010, [Online]. Available: <http://theses.gla.ac.uk/719/>.
- [15] A. Boukerche and P. Sun, “Connectivity and coverage based protocols for wireless sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 80, pp. 54–69, 2018, doi: 10.1016/j.adhoc.2018.07.003.
- [16] M. Bouallegue, “Protocoles de communication et optimisation de l’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil,” 2016.
- [17] J. Sathiamoorthy, B. Ramakrishnan, and M. Usha, “Design of a proficient hybrid protocol for efficient route discovery and secure data transmission in CEACK MANETs,” *J. Inf. Secur. Appl.*, vol. 36, pp. 43–58, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.jisa.2017.08.001.

- [18] W. A. Jabbar, M. Ismail, and R. Nordin, “Energy and mobility conscious multipath routing scheme for route stability and load balancing in MANETs,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 77, pp. 245–271, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.simpat.2017.07.001.
- [19] A. Tahir, S. A. Abid, and N. Shah, “Logical clusters in a DHT-Paradigm for scalable routing in MANETs,” *Comput. Networks*, vol. 128, pp. 142–153, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.comnet.2017.05.033.
- [20] G. Colbert, “Getting manets to communicate efficiently: An analysis of mobile ad hoc network routing schemes in tactical communications,” 2013.
- [21] E. M. Daly and M. Haahr, “The challenges of disconnected delay-tolerant MANETs,” *Ad Hoc Networks*, vol. 8, no. 2, pp. 241–250, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.adhoc.2009.08.003.
- [22] K. Pandey and A. Swaroop, “A Comprehensive Performance Analysis of Proactive, Reactive and Hybrid MANETs Routing Protocols,” *Int. J. Comput. Sci. Issues*, vol. 8, no. 6, pp. 432–441, 2011.
- [23] A. Moussaoui, F. Semchedine, and A. Boukerram, “A link-state QoS routing protocol based on link stability for Mobile Ad hoc Networks,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 39, no. 1, pp. 117–125, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.jnca.2013.05.014.
- [24] “Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges - Proceedings of the IEEE | Enhanced Reader.” moz-extension://fa938620-b7ef-467e-8951-d9110cf8b23a/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fwww.ics.uci.edu%2F~dsm%2Fics280senior%2Freadings%2Fintro%2Fchong.pdf (accessed Jun. 24, 2020).
- [25] M. Elappila, S. Chinara, and D. R. Parhi, “Survivable Path Routing in WSN for IoT applications,” *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 43, pp. 49–63, 2018, doi: 10.1016/j.pmcj.2017.11.004.
- [26] B. Rashid and M. H. Rehmani, “Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 60, pp. 192–219, 2016, doi: 10.1016/j.jnca.2015.09.008.
- [27] G. Raymond, S. Barry, and Y. Plourde, “Etat de l’art sur les WSN (Wireless Sensor Network),” *Rev. hybride l’éducation*, vol. 2, no. 1, pp. 42–55, 2018, doi: 10.1522/rhe.v2i1.131.
- [28] P. Wang, H. Hou, X. He, C. Wang, T. Xu, and Y. Li, “Survey on application of Wireless Sensor Network in smart grid,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 52, no. 1, pp. 1212–1217, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.05.161.
- [29] D. Khachane and A. Shrivastav, “Wireless Sensor Network and its Applications in Automobile Industry,” 2016.
- [30] M. Salathé, M. Kazandjieva, J. W. Lee, P. Levis, M. W. Feldman, and J. H. Jones, “A High-Resolution Human Contact Network for Infectious Disease Transmission.”
- [31] H. Alemdar and C. Ersoy, “Wireless sensor networks for healthcare: A survey,” *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2688–2710, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.003.
- [32] A. Melikov and A. Rustamov, “Queuing Management in Wireless Sensor Networks for QoS

- Measurement,” *Wirel. Sens. Netw.*, vol. 04, no. 09, pp. 211–218, 2012, doi: 10.4236/wsn.2012.49031.
- [33] K. H. Kwong *et al.*, “Practical considerations for wireless sensor networks in cattle monitoring applications,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 81, pp. 33–44, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.compag.2011.10.013.
- [34] J. S. Jin, J. Jin, Y. H. Wang, K. Zhao, and J. J. Hu, “Development of remote-controlled home automation system with wireless sensor network,” in *Proceedings of The 5th IEEE International Symposium on Embedded Computing, SEC 2008*, 2008, pp. 169–173, doi: 10.1109/SEC.2008.12.
- [35] J. Akerberg, M. Gidlund, and M. Bjorkman, “Future research challenges in wireless sensor and actuator networks targeting industrial automation,” in *2011 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Jul. 2011, pp. 410–415, doi: 10.1109/INDIN.2011.6034912.
- [36] A. Pascale, M. Nicoli, F. Deflorio, B. Dalla Chiara, and U. Spagnolini, “Wireless sensor networks for traffic management and road safety,” *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 67–77, Mar. 2012, doi: 10.1049/iet-its.2010.0129.
- [37] D. Pinto *et al.*, “HydroNode: a Low Cost, Energy Efficient, Multi Purpose Node for Underwater Sensor Networks.”
- [38] D. Dessales, “Conception d’un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation,” 2006.
- [39] G. Li, D. G. Zhang, K. Zheng, X. C. Ming, Z. H. Pan, and K. W. Jiang, “A kind of new multicast routing algorithm for application of internet of things,” *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 578–585, 2013, doi: 10.1016/S1665-6423(13)71565-7.
- [40] P. Mohanty and M. R. Kabat, “Energy efficient structure-free data aggregation and delivery in WSN,” *Egypt. Informatics J.*, vol. 17, no. 3, pp. 273–284, 2016, doi: 10.1016/j.eij.2016.01.002.
- [41] T. Rault, “Energy-efficiency in wireless sensor networks To cite this version : HAL Id : tel-01470489 Thèse présentée pour l’obtention du grade de Docteur de l’UTC,” 2017.
- [42] Y. Touati, A. Ali-Chérif, and B. Daachi, “Optimization Techniques for Energy Consumption in WSNs,” *Energy Manag. Wirel. Sens. Networks*, pp. 9–22, 2017, doi: 10.1016/b978-1-78548-219-9.50002-3.
- [43] K. Akkaya and M. Younis, “A survey on routing protocols for wireless sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 325–349, 2005, doi: 10.1016/j.adhoc.2003.09.010.
- [44] M. Ali and S. K. Ravula, “Real Time Support and Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks,” no. January, 2008.
- [45] J. N. Al-Karaki and a E. Kamal, “Wireless S Ensor N Etworks R Outing T Echniques in W Ireless S Ensor N Etworks : a S Urvey,” *Ieee Wirel. Commun.*, vol. 11, no. December, pp. 6–28, 2004, doi: 10.1109/MWC.2004.1368893.
- [46] L. Tawalbeh, S. Hashish, and H. Tawalbeh, “Quality of Service requirements and

- Challenges in Generic WSN Infrastructures,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 109, pp. 1116–1121, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.05.441.
- [47] T. Azizi and R. Beghdad, “Increasing QoS Parameters in WSNs through Spiral-Based Clustered Architecture,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 83, no. Ant, pp. 401–408, 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.04.202.
- [48] A. S. Althobaiti and M. Abdullah, “Medium Access Control Protocols for Wireless Sensor Networks Classifications and Cross-Layering,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 65, no. Iccmit, pp. 4–16, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.09.070.
- [49] K. Langendoen and A. Meier, “Analyzing MAC Protocols for Low Data-Rate Applications,” *ACM Trans. Sens. Networks*, vol. 7, no. 2, pp. 1–40, Aug. 2010, doi: 10.1145/1824766.1824775.
- [50] G. D. Mandyam, “Third-generation cellular communications: An air interface overview,” *Mob. Commun. Handbook, Third Ed.*, no. October, pp. 429–450, 2017, doi: 10.1201/b12494.
- [51] R. R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan, and N. H. Vaidya, “On designing MAC protocols for wireless networks using directional antennas,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 5, no. 5, pp. 477–491, 2006, doi: 10.1109/TMC.2006.69.
- [52] P. Nintanavongsa, M. Y. Naderi, and K. R. Chowdhury, “Medium access control protocol design for sensors powered by wireless energy transfer,” *Proc. - IEEE INFOCOM*, pp. 150–154, 2013, doi: 10.1109/INFOCOM.2013.6566753.
- [53] M. Rusyadi Ramli, J.-M. Lee, and D.-S. Kim, “Hybrid MAC Protocol for UAV-Assisted Data Gathering in a Wireless Sensor Network,” *Internet of Things*, p. 100088, 2019, doi: 10.1016/j.iot.2019.100088.
- [54] A. Ahmad and Z. Hanzálek, “Distributed Real Time TDMA Scheduling Algorithm for Tree Topology WSNs,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 5926–5933, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1484.
- [55] “LTE-M—Today’s Communication Standard for the Internet of Things - Internet Access Guide.” <https://internet-access-guide.com/lte-m-todays-communication-standard-for-the-internet-of-things/> (accessed Jun. 30, 2020).
- [56] C. Fischione IEEE, Z. ZigBee, and C. Fischione, “Fall 2009 Principles of Wireless Sensor Networks Lecture 6 Principles of Wireless Sensor Networks.”
- [57] M. A. Moridi, Y. Kawamura, M. Sharifzadeh, E. K. Chanda, M. Wagner, and H. Okawa, “Performance analysis of ZigBee network topologies for underground space monitoring and communication systems,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 71, no. August 2017, pp. 201–209, 2018, doi: 10.1016/j.tust.2017.08.018.
- [58] “802.15.4e-2012 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer.” https://standards.ieee.org/standard/802_15_4e-2012.html (accessed Jun. 24, 2020).
- [59] I. Dietrich and F. Dressler, “On the lifetime of wireless sensor networks,” *ACM Trans. Sens.*

Networks, vol. 5, no. 1, pp. 1–38, 2009, doi: 10.1145/1464420.1464425.

- [60] A. Liu, Z. Chen, and N. N. Xiong, “An adaptive virtual relaying set scheme for loss-and-delay sensitive WSNs,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 424, pp. 118–136, 2018, doi: 10.1016/j.ins.2017.09.036.
- [61] S. Kumar, A. Arora, and T. H. Lai, “On the lifetime analysis of always-on wireless sensor network applications,” in *2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, MASS 2005*, 2005, vol. 2005, pp. 186–188, doi: 10.1109/MAHSS.2005.1542797.
- [62] R. Kacimi, “Techniques de conservation d’énergie pour les réseaux de capteurs sans fil,” p. 153, 2009, [Online]. Available: <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000961/%5Cnhttp://oatao.univ-toulouse.fr/7853/1/kacimi.pdf>.
- [63] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “Energy-efficient communication protocol for wireless sensor network,” 2000.
- [64] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella, “Energy conservation in wireless sensor networks: A survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 537–568, 2009, doi: 10.1016/j.adhoc.2008.06.003.
- [65] H. Ba, I. Demirkol, and W. Heinzelman, “Passive wake-up radios: From devices to applications,” *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 8, pp. 2605–2621, 2013, doi: 10.1016/j.adhoc.2013.08.004.
- [66] S. Uke and R. Thool, “UML Based Modeling for Data Aggregation in Secured Wireless Sensor Network,” *Phys. Procedia*, vol. 78, no. December 2015, pp. 706–713, 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.02.120.
- [67] H. Kumar and P. K. Singh, “Comparison and Analysis on Artificial Intelligence Based Data Aggregation Techniques in Wireless Sensor Networks,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 132, pp. 498–506, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.05.002.
- [68] Z. Yan, V. Subbaraju, D. Chakraborty, A. Misra, and K. Aberer, “Energy-Efficient Continuous Activity Recognition on Mobile Phones.pdf,” *Iswc*, 2012.
- [69] S. Wang *et al.*, “Energy efficient broadcasting using network coding aware protocol in wireless ad hoc network,” *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 1, no. d, 2011, doi: 10.1109/icc.2011.5962913.
- [70] I.-H. Hou, Y.-E. Tsai, T. F. Abdelzaher, and I. Gupta, “AdapCode: Adaptive Network Coding for Code Updates in Wireless Sensor Networks,” pp. 1517–1525, 2008, doi: 10.1109/infocom.2008.211.
- [71] M. Wu, L. Tan, and N. Xiong, “Data prediction, compression, and recovery in clustered wireless sensor networks for environmental monitoring applications,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 329, pp. 800–818, 2016, doi: 10.1016/j.ins.2015.10.004.
- [72] X. Chu and H. Sethu, “Cooperative Topology Control with Adaptation for improved lifetime in wireless sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 30, pp. 99–114, 2015, doi: 10.1016/j.adhoc.2015.03.007.
- [73] F. M. Costa and H. Ochiai, “A comparison of modulations for energy optimization in

- wireless sensor network links,” *GLOBECOM - IEEE Glob. Telecommun. Conf.*, 2010, doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683412.
- [74] J. W. Jung, W. Wang, and M. A. Ingram, “Cooperative transmission range extension for duty cycle-limited wireless sensor networks,” *2011 2nd Int. Conf. Wirel. Commun. Veh. Technol. Inf. Theory Aerosp. Electron. Syst. Technol. Wirel. VITAE 2011*, pp. 0–4, 2011, doi: 10.1109/WIRELESSVITAE.2011.5940883.
- [75] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, “Energy-constrained modulation optimization,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 4, no. 5, pp. 2349–2360, 2005, doi: 10.1109/TWC.2005.853882.
- [76] M. Masonta, Y. Haddad, L. De Nardis, A. Kliks, and O. Holland, *Energy Efficiency in Future Wireless Networks: Cognitive Radio Standardization Requirements*. .
- [77] M. Naeem, K. Illanko, A. Karmokar, A. Anpalagan, and M. Jaseemuddin, “Energy-efficient cognitive radio sensor networks: Parametric and convex transformations,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 13, no. 8, pp. 11032–11050, 2013, doi: 10.3390/s130811032.
- [78] A. Liu, J. Ren, X. Li, Z. Chen, and X. S. Shen, “Design principles and improvement of cost function based energy aware routing algorithms for wireless sensor networks,” *Comput. Networks*, vol. 56, no. 7, pp. 1951–1967, 2012, doi: 10.1016/j.comnet.2012.01.023.
- [79] K. S. Priyadarshini, S. S. Nandhini, and M. Gunasekaran, “Energy efficient multipath routing for wireless sensor networks,” *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 2325–2329, 2020.
- [80] Z. Wang, E. Bulut, and K. B. Szymanski, “Energy Efficient Collision Aware Multipath Routing for Wireless Sensor Networks,” in *IEEE International Conference on Communications, Dresden, 2009*, pp. 1–5.
- [81] S. C. Ergen and P. Varaiya, “Optimal placement of relay nodes for energy efficiency in sensor networks,” *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 8, no. c, pp. 3473–3479, 2006, doi: 10.1109/ICC.2006.255610.
- [82] D. R. Dandekar and P. R. Deshmukh, “Energy balancing multiple sink optimal deployment in multi-hop Wireless Sensor Networks,” *Proc. 2013 3rd IEEE Int. Adv. Comput. Conf. IACC 2013*, pp. 408–412, 2013, doi: 10.1109/IAdCC.2013.6514260.
- [83] M. Azharuddin and P. K. Jana, “A distributed algorithm for energy efficient and fault tolerant routing in wireless sensor networks,” *Wirel. Networks*, vol. 21, no. 1, pp. 251–267, Jan. 2015, doi: 10.1007/s11276-014-0782-2.
- [84] L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou, and A. Lou, “Wireless power transfer and applications to sensor networks,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 20, no. 4, pp. 140–145, 2013, doi: 10.1109/MWC.2013.6590061.
- [85] W. Lou Liguang Xie, YiShi, Y. Thomas, “Wireless Energy Transfer: History, Current Status, and Recent Advances,” no. August, pp. 140–145, 2013, [Online]. Available: <http://www.intel.com>.
- [86] J. Y. Chang and P. H. Ju, “An efficient cluster-based power saving scheme for wireless

- sensor networks,” *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012, doi: 10.1186/1687-1499-2012-172.
- [87] Y. Wang, “DigitalCommons @ University of Nebraska - Lincoln Layered Clustering Communication Protocol for Wireless Sensor Networks Layered Clustering Communication Protocol for Wireless Sensor Networks,” 2007.
- [88] M. Radi, B. Dezfouli, K. A. Bakar, S. A. Razak, and M. A. Nematbakhsh, “Interference-aware multipath routing protocol for QoS improvement in event-driven wireless sensor networks,” *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 16, no. 5, pp. 475–490, 2011, doi: 10.1016/S1007-0214(11)70067-0.
- [89] M. Cherian and T. R. G. Nair, “Multipath Routing With Novel Packet Scheduling Approach In Wireless Sensor Networks,” *Int. J. Comput. Theory Eng.*, vol. 3, no. 5, pp. 666–670, 2011, doi: 10.7763/ijcte.2011.v3.389.
- [90] R. Alasem, A. Reda, and M. Mansour, “Location based energy-efficient reliable routing protocol for wireless sensor networks,” *10th WSEAS Int. Conf. EHAC’11 ISPRA’11, 3rd WSEAS Int. Conf. Nanotechnology, Nanotechnology’11, 6th WSEAS Int. Conf. ICOAA’11, 2nd WSEAS Int. Conf. IPLAFUN’11*, vol. 3, no. 1, pp. 180–185, 2011.
- [91] B. Cheng, R. Du, B. Yang, W. Yu, C. Chen, and X. Guan, “An accurate GPS-based localization in wireless sensor networks: A GM-WLS method,” in *Proceedings of the International Conference on Parallel Processing Workshops*, 2011, pp. 33–41, doi: 10.1109/ICPPW.2011.32.
- [92] T. Y. Chen, H. W. Wei, C. R. Lee, F. N. Huang, T. S. Hsu, and W. K. Shih, “EEGRA: Energy efficient geographic routing algorithms for wireless sensor network,” *Proc. 2012 Int. Symp. Pervasive Syst. Algorithms, Networks, I-SPAN 2012*, pp. 104–113, 2012, doi: 10.1109/I-SPAN.2012.22.
- [93] T. N. Quynh, T. T. Vinh, and M. B. T. Quynh, “Multipath routing for cluster-based and event-based protocols in wireless sensor networks,” *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, pp. 172–179, 2012, doi: 10.1145/2350716.2350743.
- [94] R. C. Jin, T. Gao, J. Y. Song, J. Y. Zou, and L. D. Wang, “Passive cluster-based multipath routing protocol for wireless sensor networks,” *Wirel. Networks*, vol. 19, no. 8, pp. 1851–1866, 2013, doi: 10.1007/s11276-013-0570-4.
- [95] OPNET, “<http://opnetprojects.com/opnet-network-simulator/>.”
<http://opnetprojects.com/opnet-network-simulator/>.
- [96] A. Boukerche, B. Turgut, N. Aydin, M. Z. Ahmad, L. Bölöni, and D. Turgut, “Routing protocols in ad hoc networks: A survey,” *Computer Networks*, vol. 55, no. 13. Elsevier B.V., pp. 3032–3080, Sep. 15, 2011, doi: 10.1016/j.comnet.2011.05.010.
- [97] D. B. Johnson, D. A. Maltz, and J. Broch, “DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks.” [Online]. Available: <http://www.monarch.cs.cmu.edu/>.
- [98] R. Sharma and D. K. Lobiyal, “Proficiency Analysis of AODV, DSR and TORA Ad-hoc Routing Protocols for Energy Holes Problem in Wireless Sensor Networks,” *Procedia*

Comput. Sci., vol. 57, pp. 1057–1066, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.07.380.

- [99] P. Jacquet, P. Mühlethaler, T. Clausen, A. Laouiti, A. Qayyum, and L. Viennot, “Optimized link state routing protocol for ad hoc networks,” in *Proceedings - IEEE International Multi Topic Conference 2001: Technology for the 21st Century, IEEE INMIC 2001*, 2001, pp. 62–68, doi: 10.1109/INMIC.2001.995315.
- [100] S. Mohapatra and P. Kanungo, “Performance analysis of AODV, DSR, OLSR and DSDV routing protocols using NS2 simulator,” *Procedia Eng.*, vol. 30, no. 2011, pp. 69–76, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.835.
- [101] T. Moulahi, S. Nasri, and H. Guyennet, “Broadcasting based on dominated connecting sets with MPR in a realistic environment for WSNs & ad hoc,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 35, no. 6, pp. 1720–1727, 2012, doi: 10.1016/j.jnca.2012.08.005.
- [102] C. E. Perkins and E. M. Royer, “Ad-hoc on-demand distance vector routing,” in *Proceedings - WMCSA'99: 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 1999, pp. 90–100, doi: 10.1109/MCSA.1999.749281.
- [103] D. Mahmood *et al.*, “Modeling and Evaluating Performance of Routing Operations in Reactive Routing Protocols,” *arXiv Prepr. arXiv1309.4389*, 2013.
- [104] C. E. Perkins IBM, T. Watson, and P. Bhagwat, “Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers.”
- [105] N. Beijar, “Zone Routing Protocol (ZRP).”
- [106] H. Kaur, H. Singh, and A. Sharma, “Geographic routing protocol: A review,” *Int. J. Grid Distrib. Comput.*, vol. 9, no. 2, pp. 245–254, 2016, doi: 10.14257/ijgdc.2016.9.2.21.
- [107] “OPNET Network Simulator - Opnet Projects.” <http://opnetprojects.com/opnet-network-simulator/> (accessed Jun. 24, 2020).
- [108] H. Heinzelman, W., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, “, ‘Energy-Efficient Communication Protocols for Wireless Microsensor Networks’, Proceedings of the 33rd Hawaaiian International Conference on Systems Science (HICSS), January 2000,” vol. 00, no. c, pp. 1–10, 2000.
- [109] “Ganz, A., Ganz, Z. and Wongthavarawat, K. (2004) Multimedia Wireless Networks Technologies, Standards, and QoS. Prentice Hall, Upper Saddle River. - References - Scientific Research Publishing.” <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1328315> (accessed Jun. 24, 2020).
- [110] NS2, “Network Simulator — Wikipédia.” https://fr.wikipedia.org/wiki/Network_Simulator (accessed Jun. 22, 2020).
- [111] V. K. Arora, V. Sharma, and M. Sachdeva, “A survey on LEACH and other’s routing protocols in wireless sensor network,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 127, no. 16, pp. 6590–6600, 2016, doi: 10.1016/j.ijleo.2016.04.041.
- [112] M. R. Senouci, A. Mellouk, H. Senouci, and A. Aissani, “Performance evaluation of network lifetime spatial-temporal distribution for WSN routing protocols,” *J. Netw. Comput. Appl.*,

ANNEXES

Liste des publications

Publications

1. Aadri, Alaa & Idrissi, Najlae. (2020). An AODV-Based Routing Scheme with Layered Clustering to Enhance Energy Efficiency and QoS in WSNs. In book: Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development (AI2SD'2019), pp.26-37
DOI: 10.1007/978-3-030-33103-0_4
2. Aadri, Alaa & Idrissi, Najlae. (June 2018). An advanced comparative study of MANETs routing protocols under varied number of nodes and mobility rate. Journal of communications. 13(6), pp.284-292
DOI: 10.12720/jcm.13.6.284-292
3. Aadri, Alaa & Idrissi, Najlae. (August 2017). A Cluster Based Routing Algorithm Minimizing Energy Consumption in WSN. International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN). 9(4), pp.49-62
DOI: 10.5121/ijwmn.2017.9405
4. Aadri, Alaa & Idrissi, Najlae. (June 2017). An Energy Efficient Hierarchical Routing Scheme for Wireless Sensor Networks. In the 5th International Conference of Advanced Computer Science & Information Technology. 2017, pp. 137– 148
DOI: 10.5121/csit.2017.70811
5. Aadri, Alaa & Idrissi, Najlae. (2017). Mobile Ad hoc Networks: Modelling, Application and Data Routing Evaluation. International Journal of Informatics and Communication Technology (IJ-ICT) Vol. 6, No. 1, April 2017, pp. 20-30
DOI: 10.11591/ijict.v6i1.pp20-30

Conférences internationales

1. Participation à la deuxième édition de la conférence internationale AI2SD (International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development) AI2SD'2019 à Marrakech par une communication orale intitulée : "An AODV-based routing scheme with layered clustering to enhance energy efficiency and QoS in WSNs"
2. Participation à la troisième édition de la conférence internationale CBI (Conference of Business Intelligence) CBI'2017 à la Faculté de Sciences et Techniques de Béni Mellal – Université Sultan Moulay Slimane par une communication orale intitulée : "A review of mobile ad hoc networks : modelization, application and data routing evaluation"
3. Participation à la neuvième édition de la conférence internationale WIMO (Wireless and Mobile Network) WIMO'2017 à Zurich – Suisse par une communication orale intitulée "An energy efficient hierarchical routing scheme for wireless sensor networks"