

République de Côte d'Ivoire
Union- Discipline- Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



Institut National Polytechnique Félix
HOUPHOUËT-BOIGNY de Yamoussoukro



UMRI 78

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de
la Recherche Scientifique (Tunisie)



FACULTE DES SCIENCES DE BIZERTE

Université de Carthage

THESE

Mention : **Télécommunications et Informatique**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE
L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY**

Thème

**ROUTAGE HIERARCHIQUE EFFICACE EN ENERGIE DANS
LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS-FIL ZIGBEE / IEEE
802.15.4**

Présentée et soutenue publiquement le **24 Janvier 2020** par

DIETY Srewon Guy Landry

Devant le Jury Composé de :

M. ZOUEU T. Jérémie	Professeur Titulaire Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (Yamoussoukro)	Président
M. ASSEU Olivier Pascal Kouamé	Professeur Titulaire Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (Yamoussoukro)	Directeur de Thèse
Mlle Soumaya HAMOUDA	Maître de Conférences HDR, Faculté des Sciences de Bizerte/ Université de Carthage (Tunisie)	Co-directrice de Thèse
M. Sami TABBANE	Professeur Titulaire, SUP'COM Tunis (Tunisie)	Rapporteur
M. AKA Boko	Professeur Titulaire, Université Nangui Abrogoua (Abidjan)	Rapporteur
M. DIBY Kadjo Ambroise	Maître de Conférences, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan)	Examineur

DEDICACE

A toutes ces personnes qui ont bien voulu nous accorder un peu de leur temps pour la réalisation de ce travail.

A ma famille.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a eu lieu en partenariat entre l'Ecole Doctorale Polytechnique (EDP) de l'Institut National Polytechnique Felix Houphouët-Boigny (INP-HB) et l'Ecole Supérieure de Communications de Tunis (SUP'COM).

Il a été réalisé au sein du département de recherche Electronique et Electricité Appliquée (LEEA : *Laboratoire d'Electronique et d'Electricité Appliquée*) de l'INP-HB et de l'unité de recherche en Réseau Radio-Mobile Multimédia (*MEDIATRON*) de SUP'COM. Cette Thèse est le résultat de la codirection de M. ASSEU Olivier Pascal, Professeur Titulaire à l'INP-HB de Yamoussoukro et de mademoiselle Soumaya HAMOUDA, Maître de Conférences HDR à la faculté des sciences de Bizerte (*Université de Carthage*) et membre du laboratoire MEDIATRON.

Nous leur exprimons toute notre reconnaissance pour avoir accepté de codiriger cette thèse, les remercions également pour leur disponibilité, leurs conseils et leurs orientations.

Nous tenons particulièrement à dire merci à M. Sami TABBANE, Professeur Titulaire à SUP'COM Tunis, pour nous avoir encouragé et encadré tout le long de nos travaux de recherche. Nous lui exprimons notre gratitude pour avoir accepté d'être membre de notre jury. C'est l'occasion pour nous d'exprimer notre reconnaissance envers le Professeur Mounir FRIKHA, Directeur de SUP'COM Tunis et aux membres du laboratoire MEDIATRON.

Nous exprimons notre reconnaissance envers monsieur YAO Benjamin, Professeur Titulaire et Directeur de l'école Doctorale Polytechnique (EDP) de l'Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (INPHB) de Yamoussoukro, les membres du laboratoire Génie Electrique et Electronique (GEE) avec pour Directeur M. N'ZI Edie Camille, Maître de Conférences à l'INP-HB. Nous tenons à remercier Monsieur ZOUEU Jérémie, Professeur Titulaire et M. HABA Cissé Maître de Conférences,

III

respectivement Directeur et Sous-Directeur de l'UMRI 78 (LEEAA) pour l'organisation des activités de recherches au sein de notre laboratoire.

Nous voudrions dire merci également au Professeur LOUM Georges, au Dr TETY Pierre et Monsieur TANOH Tanoh Lambert, Enseignant Chercheur, Directeur du Data Science Institute à l'INP-HB, pour leurs encouragements et conseils afin de finaliser ce travail de recherche.

Remerciements à tous les membres du Laboratoire LARIT, dirigé par monsieur OUMTANAGA, Professeur Titulaire à l'INPHB.

Nos remerciements à tous nos parents, frères, sœurs et amis pour leur encouragement et leur soutien durant toutes ces années de recherche.

Enfin, nous adressons notre reconnaissance à tous les membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font d'être présents pour l'évaluation de ce travail. Ce sont :

- Professeur Jérémie ZOUEU, Président,
- Professeur Olivier Pascal ASSEU, Directeur,
- Maître de Conférences HDR Soumaya HAMOUDA, co-Directrice,
- Professeur Samy TABBANE, Rapporteur,
- Maître de Conférences KADJO Diby Ambroise, Rapporteur,
- Professeur AKA Boko, Examineur.

RESUME

Notre Thèse traite de l'efficacité énergétique et de l'amélioration de la communication au sein du réseau de capteurs sans-fil.

En effet, avec une faible énergie (autour de 30 Joules), le nœud capteur peut collecter les données, communiquer avec d'autres nœuds capteurs, analyser des données reçues et ensuite les transmettre à la station de base. Pour cela, il dissipe de l'énergie à trois niveaux qui sont : la capture, le traitement et la communication (émission/réception). De telles énergies dissipées, épuisent la batterie du nœud capteur à long terme et celui-ci meurt par faute d'énergie. De ce fait, l'on peut affirmer que l'énergie est l'un des facteurs clé du réseau de capteurs sans-fil.

Dans le secteur de l'énergie [*Ravi T., 2014*] [*W. R. Heinzelman et al, 2002*], les travaux de recherche visant à l'optimisation de la consommation de l'énergie dans les RCSFs ont pour le moment donné les résultats satisfaisants. Les dépenses énergétiques étant récurrentes au sein du réseau de capteurs sans-fil, il nous faut trouver une solution de minimisation de ces dépenses. Pour une meilleure gestion énergétique et de la communication [*Verdone et alliés., 2017*] au sein du réseau de capteurs sans-fil, notre travail de recherche consiste à optimiser l'énergie en déchargeant les Clusters Head au sein de ce réseau d'une part, et d'autre part une amélioration du protocole de communication AODV du standard ZigBee qui est l'un des standards le plus utilisé pour la communication entre les entités de ce même réseau. Par des algorithmes de sélection de certains nœuds capteurs (Clusters Head) et par la proposition de notre protocole de communication (protocole AODV/ZigBee DIETY) cela nous a permis d'optimiser l'énergie et la durée de vie de capteurs sans-fil RCSFs.

Ces améliorations ont permis de faciliter la communication entre les différentes entités et de transmettre plus de données à la station de base.

Mots clés : Optimisation d'Energie, Réseaux de Capteurs sans-fil, Station de base, Transmission de données, Internet des Objets, Protocole ZigBee.

ABSTRACT

Our thesis is about the issues of energy efficiency within the wireless sensor network and the improvement of communication within it.

In fact, with low energy (around 30 Joules), the sensor can record information, communicate with other sensors, analyze received data and then transmit them to the base station. For this, it dissipates energy at three levels which are: capturing, processing and communicating (emission / reception). These energies dissipated will have a long term effect to get the sensor's battery out of its energy, and that sensor will die for lack of energy. As a result, energy is one of the key factors of Wireless Sensor Network.

In the sector of energy, [*Ravi T., 2014*] [*W. R. Heinzelman et al, 2002*], the research work aiming at optimising energy consumption within RCSFs have given satisfying results for the moment. But, since the problem of high energy consumption is persistent within the Wireless Sensor Network, we need to research a solution to minimize energy consumption. So, for better management of energy and efficient communication [*Verdone et al., 2017*] within wireless sensor network, our research work consists, on the one hand, to optimise energy by offloading cluster heads within the network, and on the other hand, to improve the communication protocol AODV, an ameliorated version of ZigBee standard which is one of the standards which is mostly used to communicate between entities of this same network.

By some algorithms of some sensor nodes (cluster heads) selection, and by the suggestion of our communication protocol, AODV protocol/ ZigBee DIRTY, we have been able to optimize the life time of wireless sensors nodes, and to conserve energy within RCSFs.

This improvement initiative has made able an easier communication between entities and the transmission of much more data to the base station.

Keywords: Energy Optimization, Wireless Sensor Networks, Base Station, Data Transmission, Internet of Things, ZigBee Protocol.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
RESUME.....	IV
ABSTRACT.....	V
TABLE DES MATIERES.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
ABREVIATIONS.....	XIII
SYMBOLES.....	XVII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Contexte général.....	2
Motivations et problématique.....	3
Contributions et structures de la Thèse.....	4
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS-FIL (RCSF).....	6
Introduction	7
I.1 Qu'est-ce qu'un capteur sans-fil ?.....	8
I.2 Quelques applications des réseaux de nœuds capteurs	10
I.3 Caractéristiques d'un nœud capteur sans-fil	12
I.4 Caractéristiques liés aux Réseaux de Capteurs Sans-Fil (RCSF).....	14
I.4.1 Auto-configuration des nœuds capteurs	14
I.4.2 Qualité de service	15
I.4.3 Capacité de communication	15
I.4.4 Types de communication.....	16
I.4.5 Evolutivité et collaboration entre nœuds capteurs.....	16
I.4.6 Déploiement	17
I.4.7 Tolérance aux pannes	17
I.4.8 Routage.....	18
I.4.9 Systèmes d'exploitation pour nœuds capteurs sans-fil	18

I.4.10	Avantage des RCSF.....	20
I.4.11	Contraintes liées au RCSF.....	20
I.4.12	Types de communication.....	21
I.4.13	Modèles de délivrance des données	23
I.4.14	Techniques de minimisation énergétique.....	24
I.5	Routage dans les réseaux de capteurs sans-fil.....	26
I.5.1	Contraintes de routage dans les réseaux de capteurs sans-fil.....	26
I.5.2	Classification de protocole de routage dans les RCSF.....	27
I.5.3	Protocole de routage hiérarchique	30
I.5.4	Protocole de routage non hiérarchique	32
I.5.5	Critère de performance des protocoles de routage	33
I.6	Protocole de communication des objets connectés	35
I.6.1	Réseaux longues distances	35
I.6.2	Réseaux courte distance	36
I.6.3	Protocole pour l'internet des objets.....	36
I.6.4	Comment choisir un réseau adapté à ses besoins	43
I.7	Représentation graphique d'un RCSF.....	45
	Conclusion.....	48
	CHAPITRE II L'ETAT DE L'ART.....	49
	Introduction.....	50
II.1	Définition	50
II.2	Caractéristique d'un protocole de routage hiérarchique.....	51
II.3	Election des Clusters Head.....	52
II.3.1	Communication intra-cluster.....	52
II.3.2	Communication inter-cluster.....	53
II.3.3	Niveau d'agrégation des données.....	53
II.4	Protocole de routage hiérarchique.....	53
II.4.1	LEACH-R.....	53
II.4.2	Pegasis.....	54
II.4.3	Teen.....	55
II.4.4	APTEEN.....	55
II.4.5	HEED.....	56
II.4.6	TLCP	57
II.5	Travaux existants sur la minimisation d'énergie dans les RCSF.....	60

II.5.1 Classification générale.....	60
II.5.1.1 Approches basées sur le cycle d'activité.....	62
II.5.1.2 Approches dirigées par les données.....	62
II.5.1.3 Approches basées sur la mobilité.....	63
II.5.1.4 Approches basées sur le cycle d'activité.....	64
II.5.1.5 Contrôle de topologie.....	65
II.5.1.6 Configuration de la topologie.....	66
II.5.1.7 Protocole veille/réveil.....	66
II.5.1.8 Protocole MAC avec faible cycle d'activité.....	66
II.5.2 Discussion.....	78
Conclusion.....	80

CHAPITRE III : MINIMISATION DES DEPENSES ENERGETIQUES AU SEIN DES RESEAUX CAPTEURS SANS-FIL.....81

Introduction.....	82
III.1 Contexte et justification.....	84
III.2 Modèle du réseau de capteur sans-fil	86
III.3 Solution proposée.....	87
III.3.1 Hypothèses.....	87
III.3.2 Détails de la solution proposée.....	88
III.4 Algorithme.....	90
III.4.1 Solution du Cluster Head.....	90
III.4.2 Solution du vice Cluster Head.....	92
III.5 Méthode de transmission des données.....	93
III.6 Evaluation des performances.....	94
III.6.1 Paramètres de simulation.....	95
III.6.2 Durée de vie du réseau.....	96
III.6.3 Nombre de paquets transmis à la station de base.....	99
III.6.4 Nombre de Cluster Head par tour	103
III.6.5 Nombre de nœuds morts par tour.....	106
Conclusion.....	111

CHAPITRE IV : AMELIORATION DU PROTOCOLE AODV du standard

ZIGBEE.....	112
Introduction.....	113
IV.1 Protocole AODV.....	114
IV.1.1 Définition.....	114
IV.1.2 Table de routage et paquet de contrôle.....	114
IV.1.3 Principe de fonctionnement.....	117
IV.1.4 Avantages et inconvénients d'AODV.....	121
IV.2 AODV optimisé pour le réseau de capteur sans-fil.....	122
IV.2.1 Découverte des routes.....	122
IV.2.2 Table de routage.....	124
IV.2.3 Maintenance des routes.....	124
IV.3 Procédure du réseau.....	125
IV.4 Protocole de routage et procédure de communication.....	127
IV.5 Résultat et analyse.....	137
Conclusion.....	146
CONCLUSION GENERALE.....	147
LISTE DES PUBLICATIONS.....	149
BIBLIOGRAPHIE.....	150
ANNEXES.....	159

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Capteur sans-fil	8
Figure 1.2: Architecture d'un capteur sans-fil	9
Figure 1.3 Illustration de la zone de communication et de perception d'un nœud capteur.....	14
Figure 1.4 : Type de communication dans un réseau capteur sans-fil.....	22
Figure 1.5 : Techniques de conservation d'énergie	25
Figure 1.6 : Protocoles de routage pour les réseaux capteurs sans-fil.....	27
Figure 1.7 : Routage plat.....	28
Figure 1.8 Routage hiérarchique.....	29
Figure 1.9 : Routage basé sur la localisation	30
Figure 1.10: Comparaison des technologies pour l'internet des objets	45
Figure 1.11 : Portée de la radio des nœuds	47
Figure 2.1 : Classification générale des approches d'économie d'énergie dans les RCSF.....	61
Figure 2.2 : Classification des approches basées sur le cycle d'activité.....	65
Figure 2.3 : Trame logique dans un protocole MAC à base de TDMA.....	68
Figure 2.4 : Scénario du terminal cache.....	69
Figure 2.5 : Schéma RTS/CTS pour éviter les collisions.....	71
Figure 2.6 : Préambule émetteur récepteur module radio.....	72
Figure 2.7 : Relation temporelle entre différents nœuds capteurs dans S-MAC.....	73
Figure 2.8 : Cycle d'activité de S-MAC et T-MAC.....	74
Figure 2.9 : Illustration d'un modèle en couches.....	76
Figure 2.10 : Classification des approches dirigées par les données.....	77
Figure 2.11 : Classification des approches basées sur la mobilité	77
Figure 3.1 : Modèle du réseau.....	87
Figure 3.2 : Processus de transmission des données.....	89
Figure 3.3 : Transmission du cluster Head/vice cluster Head à la station de base... ..	94
Figure 3.4 : Comparaison des nœuds vivants par tour entre DIETY, RAVIT, LEACH.....	97

Figure 3.5 : Nombre de paquets transmis à la station de base	100
Figure 3.6 : Nombre de cluster Head par tour entre les protocoles DIETY, RAVIT, et LEACH	105
Figure 3.7 : Nombre de nœuds morts par tour entre les protocoles DIETY, RAVIT et LEACH	108
Figure 4.1 : Méthode de construction d'une route.....	119
Figure 4.2 : Découverte de route	123
Figure 4.3 : Procédure au sein du réseau	126
Figure 4.4 : Architecture TBRP	130
Figure 4.5 : Requête d'appartenance	131
Figure 4.6 : Rejoindre un niveau supérieur.....	132
Figure 4.7 : Données transmises du nœud enfant aux nœuds parents	133
Figure 4.8 : Agrégation des données des noeuds.....	134
Figure 4.9 : Diffusion d'une requête d'un nœud pour rejoindre un niveau.....	135
Figure 4.10 : Nouvelle formation de l'arborescence	135
Figure 4.11 : Invalidation d'un nœud enfant	136
Figure 4.12 : Topologie arborescente	137
Figure 4.13 : Topologie maillée.....	138
Figure 4.14 : Nouvelle topologie arborescente.....	138
Figure 4.15 : Nouvelle topologie maillée.....	138
Figure 4.16 : Comparaison nombre de tours entre AODV/ZIGBEE DIETY et AODV/ZIGBEE IOT Protocol.....	140
Figure 4.17 : Comparaison durée de vie AODV/ZIGBEE DIETY et AODV/ZIGBEE IOT Protocol.....	143

TABLEAUX

Tableau 1.1 : Différentes portées des technologies.....	44
Tableau 2.1 : Classification des protocoles de routage hiérarchique.....	60
Tableau 3.1 : Paramètres de simulation	95
Tableau 4.1 : Format de message RREQ.....	115
Tableau 4.2 : Formation de message RREP.....	116
Tableau 4.3 : Formation de message RRER.....	117

ABBREVIATIONS

- ACK: ACKnowledgement ;
- ADC: Analog to Digital converter ;
- BS : Base Station ;
- CDMA : Code Division Multiple Access ;
- CH: Cluster Head ;
- CPU: Central Processing Unit ;
- CSMA-CA: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance ;
- DSN: Distributed Sensor Network ;
- FC : Fréquence de Coupure ;
- FFD : Full Function Device ;
- HEED: Hybrid Energy Efficient Distributed Clustering ;
- ICMP : Internet Control Message Protocol ;
- ID : Identifiant d'un noeud capteur ;
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers ;
- LAN: Lan Aera Network ;
- LEACH: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy ;
- MAC: Medium Access Control ;
- MANET: Mobile Ad hoc Network ;
- MHz: Mega Hertz ;
- OS: Operating System ;
- OS:I Open System Interconnection ;
- PEGASIS: Power Efficient Gathering Sensor Information System ;
- PHY: Couche Physique ;

XIV

- PSK: Phase Shift Keying ;
- QoS : Quality of Service ;
- RCSF : Réseau de Capteur Sans Fil ;
- RFD: Reduce Function Device ;
- RSSI: Received Signal Strength Indicator ;
- RTS : Request To Send ;
- RX : Mode reception du module d'un capteur ;
- SCH: Sub-Cluster Head ;
- SINR: Signal-to-Interference Noise Ratio ;
- SOS: Sensor Operating System ;
- SPIN: Sensor Protocol for Information via Negotiation ;
- SQL: Structure Query Language ;
- TDMA: Time Division Multiple Access ;
- TEEN: Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol ;
- TinyOS: Tiny Operating System ;
- TTL: Time To Live ;
- TX : Mode transmission du module radio d'un capteur ;
- Wifi: Wireless Fidelity ;
- WiMax: Worldwide Interoperability for Microwave Access ;
- WPAN: Wireless Personal Area Network ;
- WSN: Wireless Sensor Network ;
- 6LoWPAN: IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks ;
- NFC : (Near Field Communication) Communication en champ proche ;
- RFID : Identification pour Radio fréquence ;

- ACD : Convertisseur analogique numérique ;
- GPS : Global Position System / Position Global du Système ;
- Tiny OS : Le système d'explication minuscule ;
- RCSF : Le réseau de capteurs sans fil ;
- Z-Wave : Une technologie télécoms RF à faible consommation ;
- SPIN : Le protocole de détection de l'information par négociation ;
- CDMA : L'accès multiple au code de division ;
- FDMA : L'accès multiple par répartition en fréquence ;

- LEACH: Low Energy Adoptive Clustering Hierarchy;

- MAC : Media Acces Control ;
- CSMA : L'accès Multiple au sens de l'opérateur ;
- OLSR : Le routage Optimisé de l'état des liens ;
- FSR : Fisheve State Routing ;
- DSR : Dynamic Source Routing / Source de routage dynamique ;
- GSM : Système global pour mobile ;
- GPRS : Service général de radio communication par paquets ;
- UMTS : Système de télécommunication mobile universel ;
- LTE : L'évolution à long terme ;
- LP-WPAN : Réseau à faible communication réseau personnel sans fil ;
- FFD : Le dispositif complet ;
- RFD : Le dispositif à fonction réduite ;

XVI

- ZC : Le conducteur ZigBee ;
- ZR : Le routeur ZigBee ;
- AODV: « Ad Hoc On Demand Vector »;
- TREE : L'algorithme de routage arborescent ;
- IOT : L'internet des objets ;

SYMBOLES

Ω : Le domaine d'étude ;

Ω_i : Une subdivision de Ω ;

P_Ω : Une partition du domaine d'étude Ω ;

A : L'ensemble des nœuds du domaine d'étude Ω ;

A_i : L'ensemble des nœuds de la zone Ω_i de Ω ;

P_A : Une partition de l'ensemble des nœuds de Ω ;

$M(k)$: Le nombre aléatoire généré par le nœud k ;

$T(k)$: Valeur maximale définissant l'éligibilité d'un nœud pour être chef de groupe ;

P : Le pourcentage des nœuds chef de groupe ;

P_i : Pourcentage des nœuds sous-chef de groupe ;

r : Le nombre de tours ;

$R = (0, i, j)$: Repère cartésien orthonormé ;

(x_k, y_k) : Le couple de coordonnées du nœud k ;

$d(C,D)$: La distance du point C au point D ;

S_i : L'ensemble des sous-chefs de la zone Ω_i ;

Ω_{ie} : La zone où l'évènement a lieu ;

$E(k)$: L'énergie du nœud k ;

N : Le nombre de nœud du domaine d'étude Ω ;

E_{elec} : L'énergie Electronique ;

EDA : L'énergie d'Agrégation des Données ;

E_0 : L'énergie initiale ;

K : La taille du message ;

P_{opt} : La probabilité ;

E_D : Le niveau d'énergie pour les nœuds avancés ;

E_B : Le niveau d'énergie pour les nœuds intermédiaires ;

m_X : Le pourcentage de nœuds devant être avancés et intermédiaires ;

B_S : La station de base ;

(X_{BS}, Y_{BS}) : L'emplacement de la station de base ;

CH : Le nœud chef ;

CHs : Le nœud sous-chef ;

μ : La connectivité d'un réseau ;

R : Le rayon de transmission d'un nœud ;

\mathcal{N} : Le nombre de nœuds situés dans le domaine d'aire A ;

T_i : La durée de vie d'un nœud capteur ;

T_n : La durée de vie du réseau RCSF ;

$E_{x(n)}$: L'énergie Seuil d'énergie à l'étape \mathcal{N} ;

dB: Decibel ;

J: joule;

mW: Milliwatt;

INTRODUCTION GENERALE

Contexte

Face à la forte concurrence présente aujourd'hui sur le marché industriel des nouvelles technologies, améliorer efficacement les processus, produire tout en préservant l'environnement et atteindre des objectifs financiers de l'entreprise s'avèrent être des mesures cruciales à mettre en place. Dans ce contexte concurrentiel, la conception des systèmes intelligents à faible coût permet d'améliorer la productivité industrielle et l'efficacité des systèmes. Les réseaux de capteurs sans-fil (RCSF) s'inscrivent parmi les systèmes avantageux grâce aux gains qu'ils apportent en termes de rapidité de déploiement, petite taille, faible coût et auto-organisation. A cet égard, les RCSF jouent un rôle vital dans la création de systèmes industriels très fiables qui répondent rapidement aux événements en temps réel avec des actions appropriées [Erdelj et alliés, 2013].

Les réseaux de capteurs sans-fil sont constitués de plusieurs nœuds capteurs minuscules ayant pour caractéristique essentielle l'absence d'infrastructure fixe avec une topologie mobile. Leur forte implication, pose le problème d'épuisement de leurs batteries.

Dans de nombreuses applications, on recueille les données de tous les nœuds capteurs dans une station spécifique pour le traitement. Les principaux problèmes dans les réseaux de capteurs sans-fil sont l'énergie consommée par les nœuds capteurs, la sécurité, l'agrégation de données, la mobilité imprévisible des nœuds capteurs, etc. Ils sont parfois déployés dans des zones hostiles. Il est donc nécessaire d'avoir une stratégie efficace qui prend en considération l'énergie du réseau pour augmenter sa durée de vie. Cela réduit la perte d'énergie face aux changements de l'environnement. Les progrès récents dans les réseaux de nœuds capteurs sans-fil ont conduit au développement de nombreux protocoles spécifiquement conçus pour eux, où la présentation de l'énergie est un facteur essentiel. Le protocole Wifi 802.11, qui est conçu pour les réseaux LAN sans-fil, est également utilisé pour les réseaux de nœuds capteurs. Cependant, la consommation d'énergie élevée et le débit excessif

rendent ces protocoles non appropriés aux réseaux. Ceci a conduit les chercheurs à concevoir des protocoles d'accès efficaces en énergie.

L'objectif principal de la plupart des protocoles de routage est de trouver des algorithmes et des techniques efficaces en termes d'optimisation d'énergie afin que la durée de vie du réseau soit maximisée.

Motivations et problématique

Les nœuds capteurs constituent un maillon essentiel dans la collecte des données physiques sur notre environnement. Ils permettent de fournir une source de données aux objets connectés. Ils sont utilisés pour l'analyse et l'interprétation du monde qui nous entoure. Cependant, déployer un réseau de nœuds capteurs sans-fil sur un vaste territoire nécessite plusieurs défis à relever. Ce sont, entre autres, les capacités de traitement, de stockage, de transmission des données et de gestion de l'énergie.

Si beaucoup d'études ont été faites au niveau du traitement, du stockage et de la transmission, le problème de l'énergie constitue encore un véritable frein. La plupart de ces dispositifs sont alimentés par des batteries dont le remplacement périodique est un facteur limitant et impossible. En effet, l'énergie est le facteur clé du réseau de nœuds capteurs sans-fil. Un nœud capteur peut continuer à traiter les données et les transmettre si son niveau d'énergie est supérieur à un certain seuil. A l'inverse, si son niveau d'énergie est inférieur à un seuil, il se contentera de transmettre au nœud capteur voisin qui en a une bonne énergie résiduelle pour le traitement et l'acheminement des données vers la station de base. L'énergie résiduelle est donc un élément essentiel pour la bonne marche d'un réseau de nœuds capteurs sans fil.

La motivation principale de notre travail est d'optimiser l'utilisation de l'énergie pour obtenir une plus longue durée de vie du réseau de nœuds capteurs sans-fil.

Les techniques conçues pour les réseaux *ad hoc* traditionnels ne sont pas bien adaptées aux réseaux de nœuds capteurs sans-fil. Par conséquent nous nous intéressons, dans cette thèse, aux contraintes posées par le routage et la gestion de l'énergie des nœuds capteurs sans-fil, afin de prolonger la durée de vie de ces réseaux.

Pour cela, notre objectif est de proposer des algorithmes de routage efficaces en énergie en faisant participer des nœuds capteurs (**Vice-Cluster Head**), ayant un niveau d'énergie semblable au Cluster Head. Ensuite améliorer le protocole AODV du standard ZigBee pour une meilleure communication et bonne transmission au sein de réseau de nœuds capteurs sans-fil d'où nos contributions selon le modèle ci-dessous.

Contributions et structure de la Thèse

L'objectif de cette thèse est de traiter le problème du routage dans les réseaux de nœuds capteurs. Le souci principal est de prolonger la durée de vie du réseau, en économisant l'énergie dépensée par chaque nœud capteur du réseau. Pour cela, nous avons proposé un nouvel algorithme ainsi qu'une amélioration du protocole AODV (*Ad hoc On Demand Distance Vector*), un protocole de routage du standard ZigBee.

La première contribution repose sur une coopération des **Clusters Head** et Vice-Cluster Head au sein du réseau de nœuds capteurs. En effet, un nœud capteur particulier appelé "**Cluster-Head**" (CH) permet la coordination entre les membres de son cluster, l'agrégation et /ou le traitement des données collectées et la transmission au collecteur de données. CH joue ce rôle, soit d'une manière déterministe (Cluster-Head prédéfini), ou d'une manière aléatoire (Cluster-Head élu parmi les nœuds capteurs du réseau selon une métrique bien particulière). Le **Clustering**, comme tous les algorithmes d'infrastructure, doit avoir un coût minimal. Cela est d'autant plus important que le processus de **Clustering** peut être amené à s'exécuter à plusieurs reprises pour réorganiser les structures, suite à la mobilité des nœuds capteurs ou suite à d'autres pannes transitoires voire perte de nœud capteur.

La structuration du réseau en Clusters a pour objectif de réduire les communications. Cet objectif général englobe plusieurs sous-objectifs spécifiques dont l'équilibrage de la charge, la prolongation de la durée de vie du réseau, l'assurance d'une connectivité totale et une réduction des délais, l'optimisation de la bande passante et l'assurance de la qualité de service (QoS).

Le **premier chapitre**, aborde les généralités sur les réseaux de capteurs sans-fil et les réseaux *Ad-hoc*.

Quant au **deuxième chapitre**, il fait un état de l'art des travaux existants sur la réduction de la consommation d'énergie. Une Etude des différents protocoles de routage est faite, en insistant sur les spécificités liées aux réseaux de nœuds capteurs sans-fil. Les différents types de protocoles de routage sont présentés, ainsi que les modifications souhaitables pour les intégrer dans ces réseaux en utilisant le standard ZigBee / IEEE 802.15.4. Il se termine par une analyse des limites des travaux étudiés et annonce l'intérêt et le bien fondé de nos contributions.

Les **chapitres 3 et 4** présentent nos contributions relativement à l'optimisation de la consommation d'énergie des nœuds capteurs dans les RCSF et notre proposition d'amélioration d'AODV (pour Ad hoc On Demand Distance Vector), protocole de routage par défaut du standard ZigBee.

Les simulations réalisées lors de la thèse y sont analysées et leurs apports par rapport aux méthodes existantes sont largement discutés. La thèse se termine par une conclusion qui fait le bilan des travaux réalisés et les perspectives quant à leur suite.

Cette thèse a fait l'objet de deux (2) publications :

- **Article 1: “Energy Optimization In Wireless Sensor Network”**
- **Article 2: On The Improvement Of ZigBee Protocol Inside Wireless Sensor Network**

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS-FIL (RCSF)

INTRODUCTION

Un réseau de nœuds capteurs sans-fil peut être vu comme un réseau de microsystèmes disséminés dans un espace donné et communiquant entre eux via une liaison sans-fil. L'espace où agissent les nœuds capteurs s'appelle un champ de captage. Ce qui est intéressant dans ces réseaux, c'est que les nœuds capteurs sont, souvent composés d'un grand nombre de nœuds capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome. Par conséquent, on peut définir un Réseau de Nœuds Capteurs Sans-Fil (RCSF) ou « Wireless Sensor Network » (WSN) comme un ensemble de dispositifs de petite taille, nommés nœuds capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud capteur est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant les données à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans-fil.

Il existe plusieurs types de protocole de routage dans les réseaux de nœuds capteurs sans-fil. Ces protocoles de routage sont créés, afin de permettre une bonne transmission des données, la prévention des collisions et la gestion de l'économie d'énergie au sein du réseau de nœuds capteurs sans-fil. Avant d'entrer dans l'étude détaillée des protocoles de routage de réseau de nœuds capteurs sans-fil, nous commençons par présenter un nœud capteur sans-fil, ses applications et son architecture. Ensuite, nous expliquons les différentes contraintes au sein du réseau, et particulièrement la consommation d'énergie et les différentes sources causant la perte énergétique et les techniques pour minimiser cette perte.

I.1 Qu'est-ce qu'un réseau de capteurs sans-fil (RCSF)

L'évolution technologique nous permet d'accepter et de conforter la présence de l'informatique et de l'électronique au cœur du monde réel. Nous voyons de nos jours de plus en plus d'objet électroniques et d'objets connectés équipés de différents modules permettant de traiter les informations mais également de les retransmettre. La technologie des réseaux de nœuds capteurs entre dans cette catégorie. En effet, il s'agit d'un ensemble de nœuds capteurs, ayant des ressources particulièrement limitées, mais qui néanmoins ont la possibilité d'acquérir des données de l'environnement dans lequel ils sont déployés, de les traiter et de les transmettre.

Les nœuds capteurs sont des objets de taille réduite, autonomes et capables de traiter les informations de l'environnement qui les entoure, les transmettre à d'autres dispositifs grâce aux ondes radios sur une distance limitée. Les réseaux de capteurs sans-fil (RCSF) se composent d'un grand nombre de nœuds capteurs, pour former un réseau sans infrastructure établie. Chaque nœud capteur relaie l'information à un point de collecte où les toutes les données sont recueillies. Un nœud capteur contient quatre unités de base : **l'unité de capture, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de contrôle d'énergie**. Il peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires exemple : un système de localisation (GPS), ou bien un système générateur d'énergie (cellule solaire).

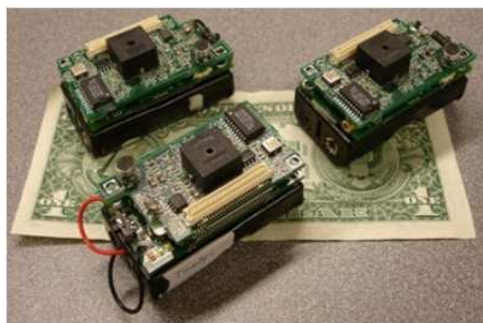


FIGURE 1.1 – Capteur sans- fil [Mehdi Bouallegue, 2016]

On peut même trouver des micro-capteurs, un peu plus volumineux, dotés d'un système mobilisateur chargé de déplacer le micro-capteur en cas de nécessité. La figure 1.2 présente les différents composants qui constituent un nœud capteur sans fil. Chaque entité joue un rôle important.

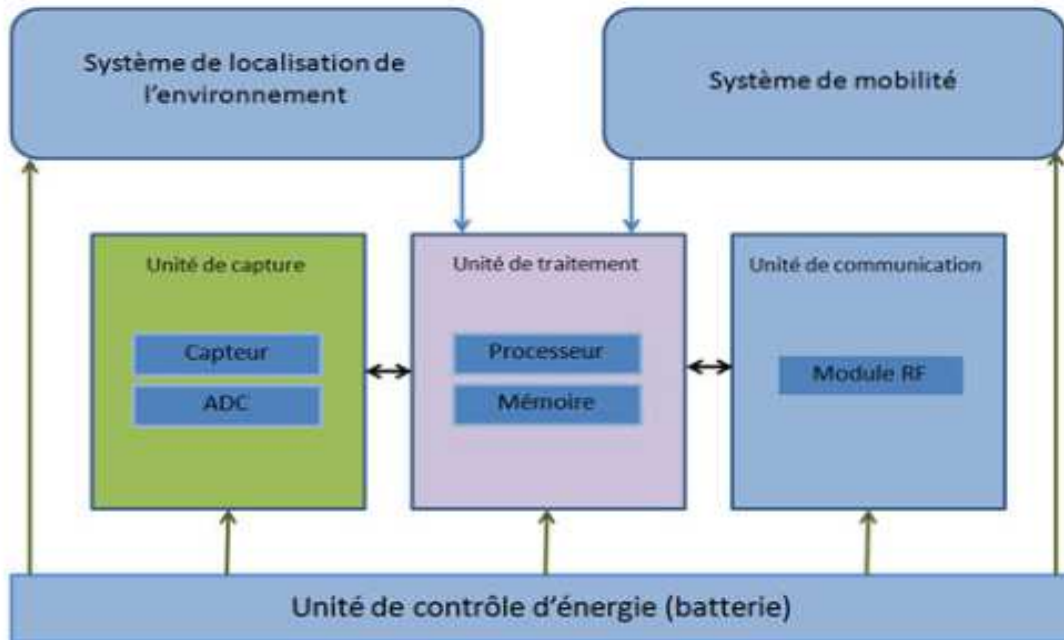


FIGURE 1.2 – ARCHITECTURE D'UN CAPTEUR SANS FIL [MEHDI BOUALLEGUE, 2016]

Unité de traitement :

L'unité de traitement est généralement composée d'une mote, d'un processeur, d'une mémoire RAM et Flash. On appelle généralement mote la carte physique utilisant le système d'exploitation pour fonctionner. Celle-ci a pour cœur le bloc constitué du processeur et des mémoires RAM et flash. Cet ensemble est la base du calcul binaire et du stockage, temporaire pour les données et définitif pour le système d'exploitation. Cette unité est chargée d'exécuter les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer le nœud capteur avec les autres entités du réseau. Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche du nœud capteur puits.

Unité de communication :

Les équipements utilisés sont donc généralement équipés d'une radio et d'une antenne. Cette unité est responsable d'effectuer toutes les émissions et réceptions des données sur un médium sans-fil. Elle peut être de type optique (comme dans les nœuds capteurs Smart Dust), ou de type radiofréquence. Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Par conséquent, elles ne peuvent pas établir de liaisons à travers des obstacles.

Unité de capture :

On y trouve des équipements de différents types de détecteurs. Le capteur est généralement composé de deux sous-unités : le récepteur (reconnaissant l'analyse) et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

Unité de contrôle d'énergie :

Un nœud capteur est muni d'une ressource énergétique pour alimenter tous ses composants. Cette énergie se présente généralement sous la forme d'une batterie (par exemple pile AA normale d'environ 2.2-2.5 Ah, fonctionnant à 1.5 V). Cependant, à cause de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée et est généralement irremplaçable. Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules photovoltaïques, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau. Cependant quelques différences existent selon les fabricants.

I.2 Quelques applications des réseaux de nœuds capteurs

La diminution de taille et de coût des micro-capteurs, l'élargissement de la gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations, ...) et l'évolution des supports de communication sans-fil ont élargi le champ d'application des réseaux de

nœuds capteurs. Les RCSF peuvent être utilisés dans plusieurs applications. Parmi elles, nous citons :

- ❖ **Découverte de catastrophes naturelles** : On peut créer un réseau autonome en dispersant les nœuds capteurs dans la nature. Des nœuds capteurs peuvent ainsi signaler des événements tels que les feux de forêts, les tempêtes ou les inondations. Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours.
- ❖ **Détection d'intrusions** : En plaçant à différents points stratégiques des nœuds capteurs, on peut ainsi prévenir des cambriolages ou des passages de gibier sur une voie de chemin de fer (par exemple) sans avoir à recourir à des dispositifs coûteux de télésurveillance.
- ❖ **Gestion de stock** : On pourrait imaginer devoir stocker des denrées nécessitant un certain taux d'humidité et une certaine température. Dans ces applications, le réseau doit pouvoir collecter ces différentes informations et alerter en temps réel si les seuils critiques sont presque atteints.
- ❖ **Contrôle de la pollution** : Des nœuds capteurs au-dessus d'un emplacement industriel offrent la possibilité de détecter le pic de pollution et de contrôler des fuites de gaz ou de produits chimiques. Ces applications permettent de donner l'alerte en un temps réel et de pouvoir suivre l'évolution de la catastrophe.
- ❖ **Agriculture** : Des nœuds capteurs peuvent être incorporés dans la terre et on peut interroger le réseau sur l'état du champ et déterminer par exemple les secteurs les plus secs afin de les arroser en priorité. Egalement équiper des troupeaux de bétail pour les suivre en tout temps, ce qui éviterait aux éleveurs d'avoir des pertes de bétail.
- ❖ **Surveillance médicale** : En implantant sous la peau de mini capteurs vidéo, on peut recevoir des images d'une partie du corps en temps réel sans aucune chirurgie. On peut ainsi surveiller la progression d'une maladie ou la reconstruction d'un muscle.
- ❖ **Surveillance de barrages** : On peut inclure sur les parois des barrages des capteurs qui permettent de calculer en temps réel la pression exercée. Il est donc possible de réguler le niveau d'eau si les limites sont atteintes. Inclure aussi des

nœuds capteurs entre les sacs de sables formant une digue de fortune. La détection rapide d'infiltration d'eau peut servir à renforcer le barrage en conséquence.

I.3 Caractéristiques d'un nœud capteur sans-fil

Les RCSFs présentent des caractéristiques propres au niveau des nœuds capteurs du réseau comme par exemple l'énergie, la portée de transmission, ainsi que la puissance de stockage. Il y'a également la bande passante, le déploiement sur une surface précise, et la topologie du réseau. Les nœuds capteurs peuvent recueillir et transmettre des données captées dans l'environnement où ils sont déployés. Les données recueillies peuvent être un indice sur la pression, la vibration, la température, la vitesse, etc. Certaines caractéristiques sont prises en compte pour la transmission des données vers d'autres nœuds composant le réseau, tel que :

L'énergie :

L'énergie est considérée comme la principale et fondamentale contrainte dans les réseaux de capteurs sans-fil. Chaque nœud capteur fonctionne grâce à une batterie ayant une capacité limitée due à sa petite taille mais également non rechargeable. L'utilisation de ces nœuds capteurs se fera, dans la plupart des cas, dans des environnements hostiles ou difficiles d'accès, ce qui ne permettra pas la récupération de ceux-ci. Nous pouvons donc dire que toute utilisation de la technologie du réseau de capteur sans-fil doit prendre en compte principalement de la problématique « consommation énergétique ».

La portée de transmission :

La capacité de transmission des nœuds capteurs est liée au rayonnement des antennes utilisées. La transmission d'information ne peut avoir lieu que si la distance entre les nœuds ne dépasse pas un certain niveau. Bien évidemment la consommation d'énergie est proportionnelle à la distance qui sépare les nœuds capteurs. Plus ceux-ci sont éloignés et plus la consommation sera importante. La topologie de la zone

géographique peut également jouer un rôle car des obstacles peuvent s'ajouter aux contraintes de la transmission des données entre les nœuds capteurs. Une zone de perception et une zone de communication peuvent être définies pour un nœud capteur. La zone de perception permet au nœud capteur de détecter des données physiques sur l'environnement qui l'entoure. Dès lors, la zone de communication permet à chaque entité du réseau d'avoir un aperçu des nœuds capteurs voisins pour de futures communications et de transmission de données. La Figure I.3 ci-dessous montre les zones définies par ces deux rayons pour le nœud capteur A. La zone de communication est la zone où le nœud capteur A peut communiquer avec les autres nœuds capteurs (le nœud capteur B). D'autre part, la zone de perception est la zone où le nœud capteur A peut capter l'événement qui s'y produit. En effet, pour qu'un nœud capteur ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant. Cependant, l'énergie consommée serait importante. Comme les nœuds capteurs sont généralement disposés sur la zone à couvrir de façon aléatoire, il est nécessaire de disposer d'une densité importante de nœuds capteurs. Mais si la densité de nœuds capteurs est trop importante et que la zone à surveiller est petite, alors des nœuds capteurs vont fonctionner inutilement.

La puissance de stockage et de traitement :

La puissance de stockage ainsi que la puissance de traitement des données pour un nœud capteur reste relativement faible. Par exemple, les nœuds capteurs de type « Tmote Sky » sont composés d'un microcontrôleur cadencé à 8 MHz, 48 Ko de mémoire et d'une radio de débit environ 250 kbps avec une fréquence pouvant aller à 2,4Ghz, la portée de transmission de ce type de nœud capteur peut atteindre 50 mètres en lieu clos et de 150m à 200m à l'extérieur.

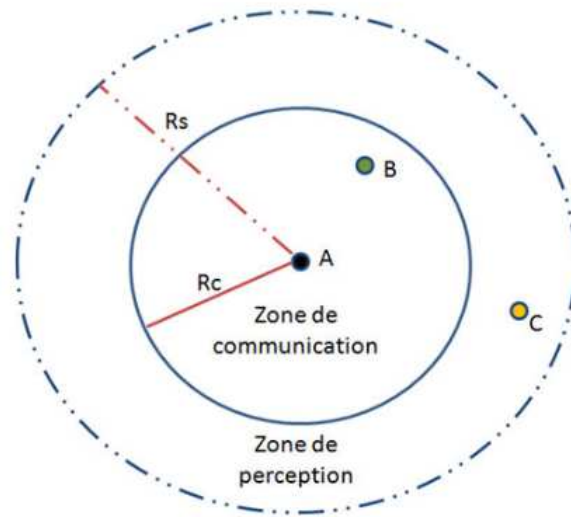


FIGURE 1.3 – ILLUSTRATION DE LA ZONE DE COMMUNICATION ET DE PERCEPTION D’UN NŒUD CAPTEUR. [MEHDI BOUALLEGUE, 2016]

Cela est valable même pour les nœuds capteurs de moyenne gamme, comme les « UCLA/ROCKWELL’S WINS », qui ont un processeur StrongARM 1100 avec une mémoire flash de 1Mo, une mémoire RAM de 128Ko et une radio dont le débit est 100Kbps

I.4 Caractéristiques liées au réseau de capteurs sans-fil (RCSF)

1.4.1 Auto-configuration des nœuds capteurs

Un réseau de nœuds capteurs sans-fil peut être déployé de deux façons différentes, soit de manière aléatoire à l’aide d’un avion ou de drones, soit de manière bien définie par l’homme. Alors un nœud capteur doit avoir la capacité de s’auto-configurer dans un réseau de nœud capteur mais également pouvoir collaborer avec les autres nœuds capteurs du réseau. Chaque nœud capteur du réseau possède un module ayant une antenne émettrice/réceptrice qui permet de communiquer avec les nœuds capteurs qui sont proches. Ainsi en échangeant des informations avec ces voisins, tout nœud capteur dans le réseau aura la possibilité de découvrir les routes qu’il adoptera suivant les besoins de l’application.

I.4.2 Qualité de service (QoS)

Dans les réseaux informatiques classiques, la Qualité de Service (QoS) signifie la capacité du système de communication à garantir les performances exigées par l'application, c'est à dire en termes de délai de transmission de bout-en-bout, de taux de perte et de débit. Cependant, les métriques de QoS sont dépendantes de l'application adoptée en raison de différentes caractéristiques spécifiques à chaque type de données utilisées. En ce qui concerne les réseaux de capteurs sans-fil, la QoS est la quantité et la qualité des informations qui sont extraites, par les données récoltées sur l'environnement ou les nœuds capteurs ont été déployés. Le niveau de qualité de service peut être défini par un ensemble de critères et d'attributs tel que le temps de latence, la bande passante, et le nombre de paquets perdus.

I.4.3 Capacité de communication

Il y a deux manières de procéder pour transmettre des données d'un nœud capteur source à un nœud capteur destinataire (puits ou point de collecte). Nous pouvons utiliser une transmission de longue portée donc avec un seul saut afin de transmettre des données vers le point de collecte ou nous avons la possibilité d'utiliser le multi-saut qui permet de transmettre à des nœuds capteurs voisins et ainsi de suite vers le point de collecte final. Comme évoqué précédemment la consommation énergétique sera proportionnelle à la distance séparant le nœud capteur transmetteur et le nœud capteur de réception, nous pouvons en conclure que le multi saut consomme moins d'énergie. Il s'agit dans ce cas d'un réseau ad-hoc, ce type de transmission de données reste le plus utilisé pour les réseaux de capteur sans-fil, qui correspond au mieux vue sa consommation énergétique.

I.4.4 Types de communication

Il existe différents types de communication utilisée dans les RCSFs :

- ❖ **Unicat:** Ce type de communication est utilisé pour échanger des informations entre deux nœuds capteurs sur le réseau.
- ❖ **Broadcat:** La station de base ou « puit » transmet des informations vers tous les nœuds capteurs du réseau. Ces informations peuvent être des requêtes de données bien précises, des mises à jour de programmes ou des paquets de contrôle.
- ❖ **Local Gossip:** Ce type de communication est utilisé par des nœuds capteurs situés dans une région bien déterminée qui collaborent ensemble afin d'avoir une meilleure estimation de l'évènement observé et d'éviter l'émission du même message vers le point de collecte ce qui contribue à consommer moins d'énergie.
- ❖ **Convergecast:** Il est utilisé dans les communications entre un groupe de nœuds capteurs et un nœud capteur bien spécifique (qui peut être le point de collecte). L'avantage de ce type de communication est la diminution de contrôle d'entête des paquets (« control over Head ») ce qui économise l'énergie au niveau du nœud récepteur.
- ❖ **Multicast:** Il permet une communication entre un nœud capteur et un groupe de nœuds capteurs. Ce type de communication est utilisé dans les protocoles qui incluent le « **clustering** » dans lesquels, le nœud capteur est appelé « **Cluster Head** » s'intéresse à communiquer avec un groupe de nœuds capteurs.

I.4.5 Evolutivité et collaboration entre nœuds capteurs

La particularité du réseau de nœuds capteurs sans-fil est qu'il soit capable de prendre en compte et gérer un très grand nombre de nœuds capteurs qui coopèrent pour un même objectif. Contrairement aux réseaux sans-fils traditionnels (personnel, local, étendue). De plus, La collaboration des nœuds capteurs est très importante dans les RCSF exemple éviter le traitement et la transmission des données redondants sur tout le réseau. Ce genre de traitement est nécessaire afin d'éviter une perte d'énergie et de

temps dans le cadre d'une optimisation de la consommation de l'énergie à travers tout le réseau.

I.4.6 Déploiement

Comme nous l'avons noté précédemment, Les nœuds capteurs peuvent être déployés d'une manière aléatoire ou déterministe.

- ❖ La méthode aléatoire où les nœuds capteurs sont éparpillés (largués par des avions par exemple) sur la zone à surveiller.
- ❖ La méthode déterministe où les nœuds capteurs sont placés de manière individuelle à des endroits bien précis dans la zone de détection.

Le nombre important de nœuds capteurs utilisés dans un réseau de nœuds capteurs empêche souvent leur redéploiement suivant un plan initialement établi. Néanmoins, un schéma général pour le déploiement initial doit être conçu pour permettre de réduire les coûts d'installation, d'augmenter la flexibilité d'arrangement des nœuds capteurs et de faciliter l'auto-organisation des nœuds capteurs et leur tolérance aux pannes.

I.4.7 Tolérance aux pannes

Le traitement des erreurs dans un réseau est un critère de bon fonctionnement d'un réseau ainsi que du protocole et des services mis en place. La tolérance aux pannes est la capacité d'assurer la continuité du fonctionnement du réseau sans interruption qui peut être due à une perte d'un ou plusieurs nœuds capteurs pendant les transmissions. Certains nœuds capteurs peuvent générer des erreurs ou ne peuvent plus transmettre à cause d'une énergie limitée. Soit une interférence survenue par des champs électriques momentanés. Alors les protocoles de routage doivent s'adapter et gérer ce genre panne afin de permettre le bon fonctionnement du réseau, même dans un milieu hostile où les nœuds capteurs vont être déployés.

I.4.8 Routage

En réseaux ad hoc, protocoles de routage sont censés appliquer trois fonctions principales:

- ❖ La détermination et la détection des changements de la topologie du réseau.
- ❖ Le maintien de la connectivité réseau.
- ❖ Le calcul et la détection des bons itinéraires.

Pour les réseaux de capteurs sans-fil, des protocoles de routage ad hoc tels que DSDV (*destination sequenced distance vecteur*), TORA (*temporally-ordered routing algorithm*), DSR (*dynamic source routing*), et AODV (*ad hoc on demand distance vector*) ne sont pas adaptées. La cause, le type de trafic appelé « plusieurs à un » et tous les nœuds capteurs transmettent à une seule station de base ou centre de fusion. Néanmoins, certains protocoles se rapportent aux caractéristiques des réseaux de capteurs, comme la communication multi-sauts et le routage QoS. Le routage peut être associé à la compression des données pour améliorer l'évolutivité du réseau.

I.4.9 Systèmes d'exploitation pour nœuds capteurs sans-fil

Il existe sur le marché, plusieurs types de systèmes d'exploitation en fonction de chaque constructeur ou fabricant. Dans cette partie, nous allons citer quelques systèmes d'exploitation :

Créé par les chercheurs de l'Université de Berkeley [P. Levis, 2006], **le système TinyOS (Tiny Operating System)** est un système d'exploitation open source intégré. Il est modulaire et bien adapté aux nœuds capteurs sans-fil pour les systèmes embarqués. Il a été programmé sous NesC [D. Gay et alliés, 2003].

Ces principales caractéristiques sont : **l'événementiel** qui lui permet de faire la gestion d'événements ; **Le non préemptif**, occasionne la priorité aux interruptions matérielles sans gérer le mécanisme de préemption entre les tâches ;

Le non temps réel occasionne la réduction du temps de traitements en ne gérant pas les niveaux de priorité entre les différentes tâches ;

La faible consommation d'énergie, favorise l'optimisation de la consommation d'énergie des nœuds capteurs à travers une faible consommation de ces nœuds capteurs.

Le système d'exploitation Contiki et Rime est un système d'exploitation conçu par des chercheurs suédois [*Dunkels et alliés. 2004*]. Il est modulaire et open source bien adapté aux nœuds capteurs sans-fil miniatures ayant des ressources faibles. Ses principaux avantages sont : Sa flexibilité et sa portabilité, car il supporte les protocoles IPv6 et 6LoWPAN avec l'implémentation de deux mécanismes de communication que sont :

- ❖ **La couche Rime** [*Dunkels et alliés. 2007*] donne des instructions à la couche applicative pour la connexion des nœuds capteurs voisins ;
- ❖ **La couche uIP** [*Dunkels, 2003*] implémente les protocoles uIPv4, uIPv6, IP, TCP, UDP et ICMP.

Le système Contiki et Rime utilise le protocole 6LoWPAN conçu pour les communications radio en se basant sur la norme IEEE 802.15.4 pour une taille de paquet limitée à 127 octets.

Le système d'exploitation MANTIS OS (Multimodal Networks of In-situ micro Sensor) [*S. Bhatti et alliés. 2005*] a été créé par des chercheurs du groupe MANTIS de l'Université de Colorado Boulder en langage C. Le système est léger et multitâche, adapté aux nœuds capteurs sans-fil. Ce qui lui permet de supporter un nombre important de plateformes de réseau de nœuds capteurs sans-fil. Il est composé de trois parties essentielles : La couche DEV donne l'accès aux périphériques Entrée / Sortie. La couche NET gère la pile de communication au niveau utilisateur, et la couche COM, en relation avec la couche MAC, occasionne l'accès aux périphériques de communication comme le port série et la radio.

Le système d'exploitation SOS développé par des chercheurs [*C-C. Han et alliés. 2005*]. Il est propice aux réseaux de nœuds capteurs sans-fil dynamiques et modulaires. Son atout est de permettre la reconfiguration dynamique en modifiant pour chaque nœud capteur le code après le déploiement du réseau de nœuds capteurs sans fil. Ce

qui facilite les mises à jour et le rajout de nouveaux modules. Il contribue en outre, à l'allocation dynamique de la mémoire. Avec son noyau, ce système d'exploitation permet la gestion et l'interaction avec plusieurs nœuds capteurs et leur module à travers son API (Application Programming Interface). Cela facilite et rend plus efficace les convertisseurs DC (convertisseur analogique - numérique).

I.4.10 Avantages des RCSF

Les nœuds capteurs ont de nombreux avantages pour la surveillance environnementale : Ils sont autonomes en énergie, ont un faible coût et moins coûteux pour le déploiement), faciles à déployer et ont peu d'impact sur l'environnement. Ils peuvent fonctionner aussitôt après déploiement et ne nécessitent aucune intervention humaine. Ce sont tous ces avantages des nœuds capteurs qui font du RCSF, un bon candidat pour réaliser les applications de surveillance environnementale.

I.4.11 Contraintes liées aux RCSF

Un RCSF subit néanmoins des contraintes qui lui sont propres et font de sa mise en œuvre un véritable challenge. Un RCSF doit faire face à des défis techniques venant des faibles ressources intrinsèques des nœuds capteurs. Les nœuds capteurs ont une quantité d'énergie, une portée limitée de communication, un faible débit, une capacité de mémoire et de stockage faibles et une puissance de calcul réduite. Une fois que les nœuds capteurs sont déployés, ils doivent être opérationnels pendant longtemps sur des sites étendus sans infrastructure fixe, ce qui nécessite une gestion efficace de l'énergie (limitée et souvent irremplaçable), une capacité d'auto-organisation pour faire face à l'évolution des liaisons radio, et une redondance dans la topologie pour compenser la défaillance de certains nœuds capteurs.

I.4.12 Types de communication

Conceptuellement, la communication dans un RCSF peut être classée en deux catégories : **communication d'application** et **communication d'infrastructure**. La communication d'application concerne, essentiellement, les données captées ou les informations obtenues à partir des nœuds capteurs dans la perspective d'informer l'utilisateur final sur le phénomène observé.

Deux modèles existent pour ce type de communication : le modèle coopérative permettant aux nœuds capteurs de communiquer avec d'autres pour satisfaire l'objectif de l'utilisateur final et le modèle non coopérative dans lequel les nœuds capteurs n'ont pas besoin de coopérer pour la dissémination des données. En général, la communication d'infrastructure se réfère aux communications nécessaires pour configurer, maintenir et optimiser certaines opérations. Ces communications sont fortement liées, aux spécificités de l'application considérée puisque le réseau doit être capable de s'auto- configurer, afin de satisfaire ces spécificités. La communication d'infrastructure représente les messages de contrôles des protocoles réseaux (*over Head*), il est donc important de la minimiser le plus possible, tout en assurant une meilleure communication d'application. En principe, dans un RCSF, deux types de nœuds capteurs sont reconnus: Les nœuds capteurs dont la tâche principale est de transmettre ses propres données collectées (nœuds capteurs) et les nœuds capteurs qui assurent, essentiellement, le relayage des paquets de données (nœuds capteurs relais). Ainsi, les données d'un nœud capteur sont routées des nœuds capteurs sources vers le Sink via les nœuds capteurs relais en créant une topologie multi-sauts. Cette organisation logique permet de dégager les quatre types de communication Figure 1.4.

Les explications générales de chaque type de communication sont définies comme suit:

a) La communication de type nœud capteur à nœud capteur

Ce type de communication directe figure (1.4 partie a) est utilisé dans les opérations locales entre nœuds capteurs par exemple, durant les processus de mise en cluster (ou clustering) ou de création de chemins de routage.

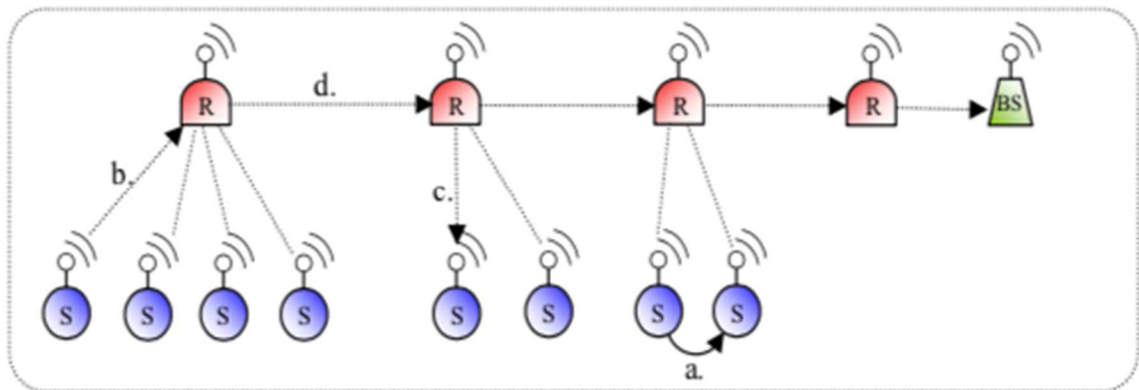


FIGURE 1.4: TYPES DE COMMUNICATION DANS UN RCSF [KECHAR BOUABDELLAH, 2010]

b) La communication de type nœud capteur à nœud relais

Dans ce cas, figure (1.4 partie b) les données collectées sont transmises du nœud capteur vers un nœud capteur relais. Ce type de communication est souvent unicast.

c) La communication de type nœud relais à nœud capteur

Elle est utilisée dans le cas de la transmission, figure (1.7 partie c) souvent, multicast, de requêtes (données ou messages de signalisation) formulées par un utilisateur via le Sink et certains nœuds relais pour atteindre un sous ensemble de nœuds capteurs à la fois.

d) La communication de type nœud relais à nœud relais

Les nœuds capteurs relais forment, en réalité, l'épine dorsale (ou *Backbone*) d'un RCSF figure (1.4 partie d). La communication entre ces nœuds capteurs est dans la plupart des cas unicast. Ces nœuds capteurs sont capables d'effectuer cette activité de relayage à partir du moment où chacun d'eux est à *priori*, équipé d'une interface sans-fil de communication (ou *Transcepteur*).

I.4.13 Modèles de délivrance des données

Les données ou les informations générées au niveau des nœuds capteurs peuvent être transmises vers l'utilisateur final ou le centre de traitement selon plusieurs modèles de délivrance : continu, dirigé par les événements, à la demande ou hybride.

❖ Le modèle continu:

Les nœuds capteurs sont ordonnés pour transmettre périodiquement, les données captées tant qu'ils sont en vie. Le type de la requête est fortement persistant (par exemple rapporter les résultats de la capture toutes les 10 secondes). La délivrance des données n'est pas à temps critique.

❖ Le modèle dirigé par événements:

Les nœuds capteurs sont forcés de démarrer la capture des données seulement lorsqu'un événement se produit. Le type de la requête est, dans ce cas, faiblement persistant (par exemple transmettre une alerte lorsque la température dépasse un seuil de 200°F). La délivrance des données est à temps critique, mais peut dépendre, largement, des utilisateurs finaux/applications.

❖ Le modèle à la demande:

Il est parfois appelé modèle dirigé par des requêtes. Dans ce scénario, la capture des données par les nœuds capteurs est invoquée par des requêtes explicites transmises par l'utilisateur. Le type de la requête est instantané (par exemple, quelle est la température dans la zone industrielle ?). La délivrance des données est à temps critique en général.

Enfin, les trois modèles peuvent coexister dans un même RCSF. Nous parlons alors de modèle de délivrance hybride.

I.4.14 Techniques de minimisation énergétique

Dans les réseaux ad hoc, la consommation de l'énergie a été considérée comme un facteur déterminant mais pas primordial car les ressources d'énergie peuvent être remplacées par l'utilisateur. Ces réseaux se focalisent plus sur la QoS (Quality of Service) que sur la consommation de l'énergie. Par contre, dans les réseaux de capteurs, la consommation d'énergie est très importante puisque généralement les nœuds capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles. Ainsi, il est difficile voire impossible de remplacer les batteries après leur épuisement. De ce fait, la consommation d'énergie au niveau des nœuds capteurs a une grande influence sur la durée de vie du réseau. Après la description des principales causes de consommation d'énergie dans les RCSF, nous présentons dans ce qui suit les différentes techniques utilisées pour minimiser cette consommation. Ces techniques sont appliquées soit au niveau de la couche liaison soit au niveau de la couche réseau. La figure I.5 ci-dessous donne un aperçu global de ces mécanismes :

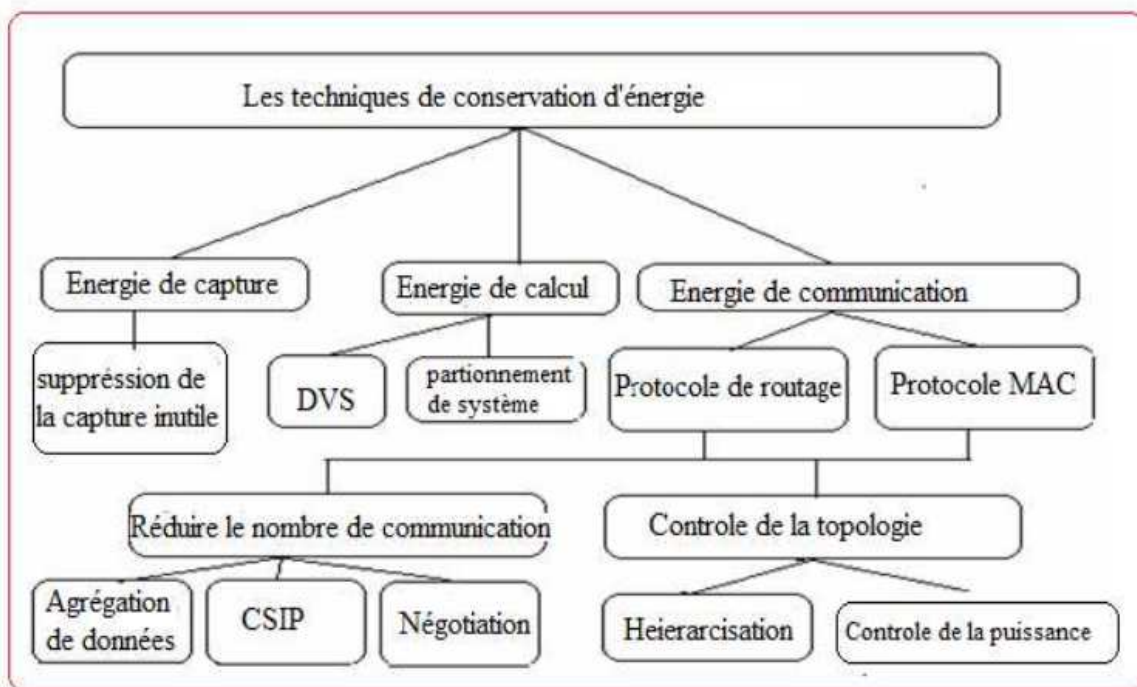


FIGURE 1.5 TECHNIQUES DE CONSERVATION D'ENERGIE

L'énergie du nœud capteur peut être économisée soit au niveau de la capture, au niveau du traitement ou au niveau de la communication.

- A. La solution apportée pour la minimisation de la consommation d'énergie au niveau de la capture consiste à réduire les fréquences et les durées de captures.
- B. L'énergie de calcul peut être optimisée en utilisant deux techniques :
 - ❖ L'approche DVS (*Dynamique Voltage Scaling*) qui consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation, la fréquence du microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances.
 - ❖ L'approche de partitionnement de système qui consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul.
- C. La minimisation de la consommation d'énergie pendant la communication est étroitement liée aux protocoles développés pour la couche réseau et la sous-couche MAC. Ces protocoles se basent sur plusieurs techniques : l'agrégation de données, la négociation et à la technique CSIP (*Collaborative Signal and Information Processing*).

Cette dernière technique est une discipline qui combine plusieurs domaines: la communication et le calcul à basse puissance, le traitement de signal, les algorithmes distribués, la tolérance aux fautes, les systèmes adaptatifs et la théorie de fusion des capteurs et des décisions. Ces techniques ont le but de réduire le nombre d'émission / réception des messages.

I.5 Routage dans les réseaux de capteurs sans-fil

L'objectif principal d'un protocole de routage pour un réseau de capteurs sans-fil est l'établissement correct et efficace d'itinéraires entre une paire de nœuds capteurs afin que des messages puissent être acheminés. Le protocole de routage permet aux nœuds capteurs de se connecter directement les uns aux autres pour relayer les messages par des sauts multiples et de transmettre les données vers un point de collecte. Nous présentons dans ce chapitre un état de l'art des principaux protocoles de routage dans les réseaux RCSF car la présentation de ces protocoles nous permettra de mieux analyser le fonctionnement.

I.5.1 Contraintes de routage dans les réseaux de capteurs sans-fil

Le routage dans les réseaux de capteurs diffère de celui des réseaux Ad Hoc dans les points suivants :

- ❖ Il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global pour le grand nombre de nœuds.
- ❖ Les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement de données mesurées depuis des sources multiples vers la destination finale « Sink ».
- ❖ Les différents nœuds capteurs peuvent générer ou produire les mêmes données à proximité d'un phénomène (problème de la redondance des données).
- ❖ Les nœuds capteurs exigent une gestion soigneuse des ressources.

En raison de ces différences, de nouveaux protocoles de routage ont été proposés dans les réseaux de capteurs sans-fil.

I.5.2 Classification des protocoles de routage dans les RCSF

Les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans-fil peuvent être classés selon deux concepts :

- ❖ la structure de réseau
- ❖ le type de protocole

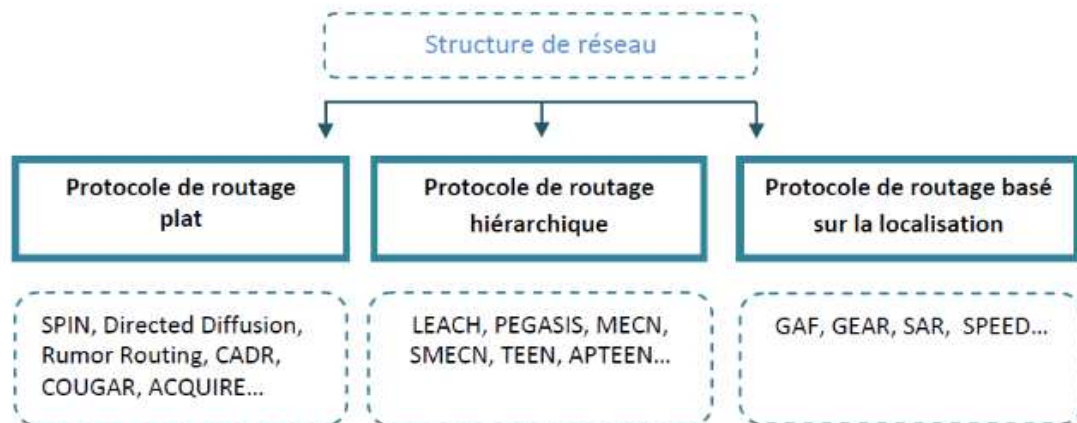


FIGURE 1.6: PROTOCOLES DE ROUTAGE POUR LES RCSF

* Protocole de routage multi-chemin

Il se base sur l'adoption de plusieurs chemins menant vers la destination, pour avoir des chemins de secours si jamais le chemin principal serait rompu.

* Protocole de routage basé sur la négociation des données

En détectant le même phénomène, les nœuds capteurs inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. En effet avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation appelés META-DATA. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds capteurs voisins disposent des mêmes données à transmettre. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données.

* Protocole de routage basé sur les interrogations

La collecte des informations sur l'état de l'environnement est initiée par des interrogations envoyées par le nœud « Sink ».

* Protocole de routage basé sur la QoS

Ce type de protocole tend à satisfaire certaines métriques, pendant la transmission des données vers la destination finale. Parmi ces métriques, nous pouvons citer : le délai de bout en bout, la gigue, PDR (Paquet Delivery Ratio), énergie consommée.

* Protocoles de routage plat (*flat based-routing*)

Ces protocoles considèrent que tous les nœuds capteurs sont identiques Figure 1.7. C'est à dire ont les mêmes fonctions à exécuter sauf le nœud capteur de contrôle (*Sink*) qui est chargé de collecter toutes les informations issues des différents nœuds capteurs pour les transmettre vers l'utilisateur final. La décision d'un nœud capteur de router des paquets vers un autre dépendra de sa position et pourra être remise en cause au cours du temps.

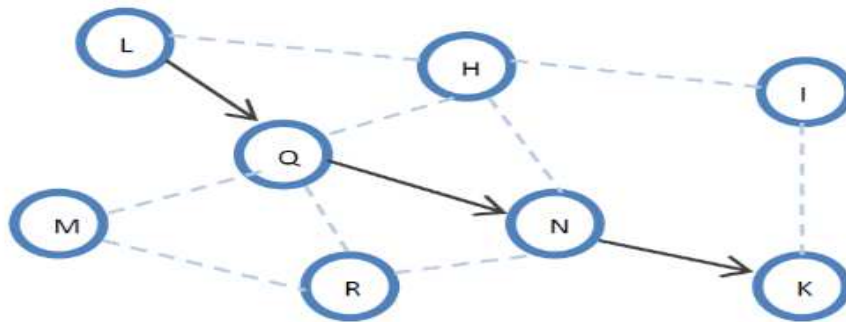


FIGURE I.7: ROUTAGE PLAT

* Protocoles de routage hiérarchique

Ces protocoles fonctionnent en confiant des rôles différents aux nœuds capteurs du réseau. Certains nœuds capteurs sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières. Un nœud capteur peut être par exemple, une passerelle pour un ensemble de nœuds capteurs. Dans ce cas le routage devient plus simple, puisqu'il s'agit de

passer par les passerelles pour atteindre le nœud capteur destination qui lui est directement attaché. Un exemple est donné par la figure 1.8. Pour que les paquets générés par le nœud capteur F atteignent le nœud capteur L, ils doivent passer par les passerelles P, S et R.

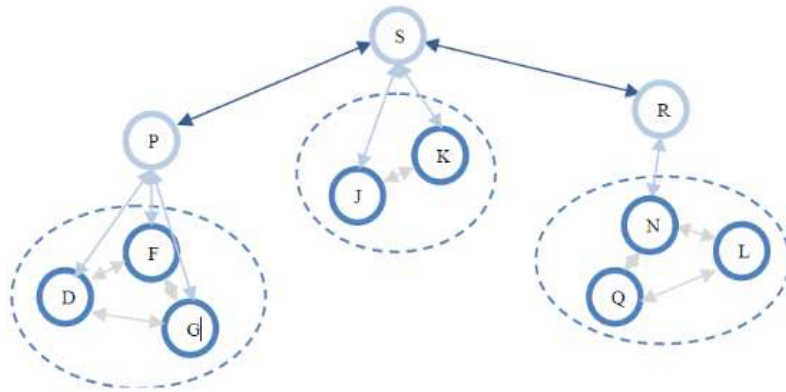


FIGURE 1.8: ROUTAGE HIERARCHIQUE

Le principe des protocoles de routage hiérarchique est basé essentiellement sur les nœuds capteurs passerelles. En fait, les nœuds capteurs ordinaires savent que si le destinataire n'est pas dans leur voisinage direct, il suffit d'envoyer la requête à la passerelle qui la prendra en charge. A son tour, elle transmettra cette requête vers le nœud capteur ciblé. Ce type de routage présente de nombreux avantages pour les réseaux dont les nœuds capteurs sont sédentaires et disposent de suffisamment d'énergie.

* Protocoles de routage avec géolocalisation

Un routage est du type géolocalisation lorsque, les décisions de routage sont basées sur la position des nœuds capteurs, description à la figure 1.9. Les prés-requis pour effectuer un routage de géolocalisation dans un réseau ad hoc sont :

- ❖ Tous les nœuds capteurs possèdent un moyen de localisation, soit un système intégré comme le GPS (Global Position System), soit un système logiciel comme un protocole de localisation.

- ❖ Un nœud capteur source connaît toujours la position du nœud capteur destinataire. Pour ce faire, soit tous les nœuds capteurs connaissent les positions initiales de tous les autres, soit un service de localisation est utilisé.

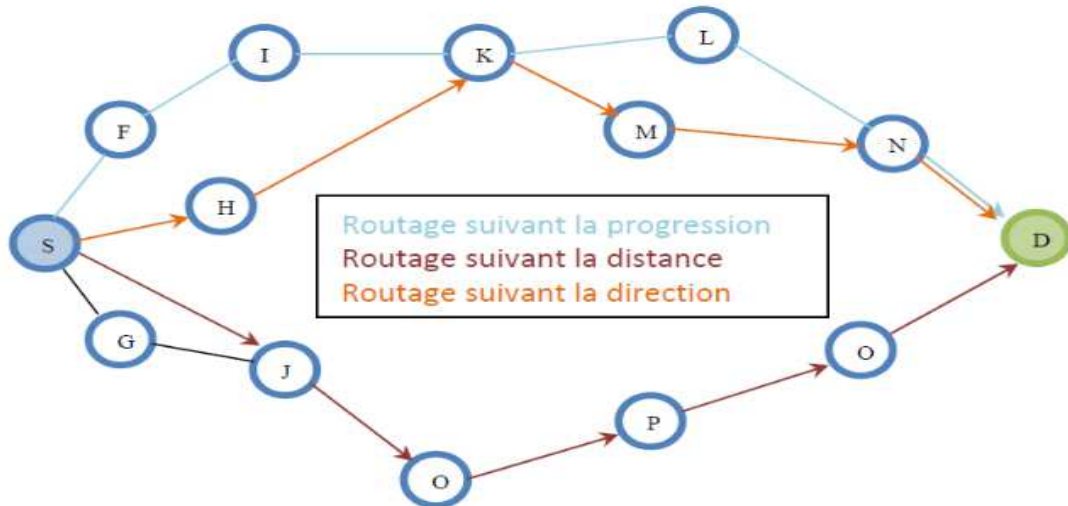


FIGURE 1.9: ROUTAGE BASE SUR LA LOCALISATION

* Protocoles de routage proposés pour les RCSF

Nous citons dans cette section quelques protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs sans-fil.

I.5.3 Protocoles de routage hiérarchique

***LEACH**

L'idée est de former des clusters de nœuds capteurs en se basant sur la force du signal reçue et d'employer le Cluster Head comme routeur du Sink. Tout traitement de données est local au Cluster. Le rôle de Cluster Head est échangé aléatoirement entre les nœuds capteurs afin d'équilibrer les charges.

***PEGASIS (*Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems*)**

PEGASIS est une amélioration du protocole LEACH. Au lieu de former plusieurs Clusters, PEGASIS forme des chaînes de nœuds capteurs. Chaque nœud capteur transmet et reçoit de son voisin appartenant à la chaîne. Un seul nœud capteur est choisi parmi cette chaîne, pour transmettre au Sink. Ce nœud capteur est appelé Leader Node. Les données recueillies vont d'un nœud capteur à un autre. Elles sont agrégées puis envoyées au Sink par le nœud capteur Leader. Avec PEGASIS hiérarchique, les nœuds capteurs construisent une chaîne qui forme un arbre hiérarchique. Chaque nœud capteur Leader choisi dans un niveau particulier, transmet des données aux nœuds capteur du niveau supérieur de la hiérarchie jusqu'à atteindre la station de base Sink [DE07].

***TEEN et APTEEN (*Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol*)**

TEEN est un protocole hiérarchique conçu pour être sensible aux changements improvisés des attributs détectés tels que la température. L'architecture du réseau est basée sur un groupement hiérarchique où les nœuds capteurs les plus proches forment des Clusters. Après la construction des Clusters, le Cluster Head diffuse deux seuils aux nœuds capteurs. Ceux sont la valeur minimale d'un attribut pour pouvoir être transmis et le degré minimale du changement de cet attribut. Le TEEN adaptatif (APTEEN) est une extension du TEEN basée sur la capture périodique des données et la réaction aux événements temps-réel. Quand la station de base forme les Clusters, les Cluster Head diffusent leurs attributs, leurs seuils et le plan de transmission à tous les nœuds capteurs. Ils effectuent également l'agrégation des données afin d'économiser l'énergie [DE07].

***SAR (*Sequential Assignment Routing*)**

SAR est une approche multi-chemins qui s'efforce à réaliser l'efficacité énergétique et la tolérance aux fautes. SAR crée des arbres en prenant en compte les métriques QoS, la ressource énergétique sur chaque chemin et le niveau de priorité de chaque paquet. En utilisant ces arbres, des routes multiples du Sink aux nœuds capteurs sont formés. Une ou plusieurs routes peuvent être empruntées.

I.5.4 Protocoles de routage non hiérarchique

***AODV (*Ad-hoc On Demand Distance Vector*)**

C'est un protocole à vecteur de distance, comme DSDV, mais il est réactif plutôt que proactif comme DSDV. En effet, AODV ne demande une route que lorsqu' il en a besoin. AODV utilise les numéros de séquence d'une façon similaire à DSDV pour éviter les boucles de routage et pour indiquer la « nouveauté » des routes. Une entrée de la table de routage contient essentiellement l'adresse de la destination, l'adresse du nœud capteur suivant, la distance en nombre de sauts (i.e. le nombre des nœuds capteurs nécessaires pour atteindre la destination), le numéro de séquence destination, le temps d'expiration de chaque entrée dans la table.

***SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*)**

L'idée derrière le SPIN est d'échanger des informations sur les données à envoyer en utilisant des paquets de signalisations nommés Meta-DATA. Ceci permet d'éviter le problème des données redondantes. Chaque nœud capteur, s'intéressant à la donnée référencée par ce paquet Meta-DATA, peut les récupérer en envoyant un paquet de requête.

***DSDV (*Destination Sequenced Distance Vector*)**

DSDV est un protocole proactif de routage à vecteur de distance. Chaque nœud capteur du réseau maintient une table de routage contenant le saut suivant et le nombre de sauts pour toutes les destinations possibles. Des diffusions de mises à jour périodiques tendant à maintenir la table de routage complètement actualisée à tout moment.

***GSR (*Global State Routing*)**

Le protocole GSR est un protocole similaire au protocole DSDV décrit précédemment. Ce protocole utilise les idées du routage basé sur l'état des liens (Link State, LS), et les améliore en évitant le mécanisme inefficace d'inondation des messages de routage. GSR utilise une vue globale de la topologie du réseau, comme c'est le cas dans les

protocoles basés sur LS. Le protocole utilise aussi une méthode, appelée la méthode de dissémination, utilisée dans le DBF (Distributed Bellman-Ford).

***DSR (*Dynamic Source Routing*)**

DSR est un protocole de routage réactif qui utilise le routage de source afin d'envoyer des paquets de données. Dans ce type de routage, les entêtes des paquets de données portent la séquence des nœuds capteurs à travers lesquels le paquet doit passer. Ceci signifie que les nœuds capteurs intermédiaires ont juste besoin de garder des traces de leurs voisins intermédiaires afin de transférer les paquets de données. Le nœud capteur source a besoin de savoir l'ordre complet des nœuds capteurs jusqu'à la destination.

***OLSR (*Optimized Link State Routing*)**

Comme son nom l'indique, OLSR est un protocole proactif à état des liens optimisé ; Il permet d'obtenir aussi des routes de plus court chemin. Alors que dans un protocole à état des liens, chaque nœud capteur déclare ses liens directs avec ses voisins à tout le réseau, dans le cas d'OLSR, les nœuds capteurs ne déclarent qu'une partie de leur voisinage grâce à la technique des relais multipoints (Multi Point Relaying, MPR).

***GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*)**

La topologie a un caractère relativement provisoire dû à la mobilité des nœuds capteurs dans les réseaux Ad-hoc et de nœuds capteurs mobiles. Pour cette raison, les protocoles de routage les plus étudiés pour ce type de réseau sont les protocoles de routage de géolocalisation car ils permettent d'éviter la surcharge d'informations échangées entre les nœuds capteurs qui cherchent à obtenir la topologie du réseau ou à construire les tables de routage. Ce protocole de routage de géolocalisation se base sur le fait que tous les nœuds capteurs connaissent leur position. Ceci, grâce à un équipement GPS (Global Positioning System) ou encore par un système de positionnement distribué.

I.5.5 Critères de performance des protocoles de routage

- ❖ La performance des réseaux de capteurs sans fil est fondée sur les facteurs suivants : Evolutivité : l'évolutivité est un facteur important dans les réseaux de

capteurs sans fil. Une zone de réseau n'est pas toujours statique, elle change selon les besoins des utilisateurs. Tous les nœuds dans le domaine du réseau doivent être évolutifs ou être en mesure de s'adapter aux changements dans la structure du réseau en fonction de l'utilisateur.

- ❖ L'énergie : chaque nœud utilise peu d'énergie pour des activités telles que la détection, le traitement, le stockage et la transmission. Un nœud dans le réseau doit savoir combien d'énergie sera utilisée pour effectuer une nouvelle tâche à laquelle il est soumis. L'énergie consommée peut varier selon le type de fonctionnalité ou l'activité qu'il a à accomplir.
- ❖ Le temps de traitement: il se réfère au temps pris par le nœud dans le réseau pour assurer l'ensemble de l'opération commençant par la détection, le traitement des données ou le stockage de données, la transmission ou la réception sur le réseau.
- ❖ Le schéma de transmission: la transmission de données par les nœuds de capteurs vers la destination ou la station de base se fait par un schéma de routage à un seul saut ou à multi-saut.
- ❖ La capacité du réseau : tous les nœuds du réseau de capteurs utilisent certaines ressources du réseau qui les aident à accomplir certaines activités comme la détection ou la transformation.
- ❖ Synchronisation : dans les communications radio entre les nœuds de capteurs d'un WSN, les capteurs écoutent en permanence les transmissions et consomment de l'énergie s'ils ne sont pas synchronisés les uns les autres. Pour cela, un nœud doit avoir la même notion de temps pour se mettre en veille et se réveiller que ses voisins.
- ❖ Contrôle de paquets: un paquet envoyé avant la transmission entre deux nœuds est appelé le paquet de contrôle. Le paquet de contrôle contient le nombre de bits de données envoyés, l'adresse du nœud de destination et certaines informations qui contribuent à éviter les collisions pendant la transmission

La technologie des réseaux de capteurs sans-fil reste très prometteuse, et leur défi majeur est de trouver des protocoles de routage qui permettent, à la fois, de :

- ❖ Consommer le moins d'énergie possible.
- ❖ Assurer la connectivité du réseau et la couverture du champ surveillé.
- ❖ Assurer une livraison fiable et rapide.
- ❖ Tolérance aux pannes.
- ❖ S'adapter aux changements de topologie évolutive.

I.6 Protocoles de communication des objets connectés

Si de nombreuses technologies de télécommunications sont bien connues, à commencer par le Wi-Fi, le Bluetooth, ZigBee et les technologies cellulaires 2G/3G/4G. Il faut également, compter avec de nouvelles autres plus intéressantes comme Thread pour les applications domotiques et les technologies TV White Space, actuellement déployées dans les grandes villes pour une utilisation basée sur l'IoT en zone élargie.

En fonction de l'application, certains facteurs spécifiques tels que la portée, les exigences en termes de données, les questions de sécurité d'alimentation et l'autonomie de la batterie détermineront la ou les technologies à utiliser. Les installateurs de réseaux ont le choix parmi les principales technologies de télécommunications citées ci-dessous [RS Components, avril 2015].

I.6.1 Réseaux longues distances

Pour les réseaux de longue portée, nous avons le réseau classique GSM cellulaire (**GSM, 2G, 3G, 4G** et bientôt **5G**), mais à côté de cela, des opérateurs privés ont investi pour la longue portée, notamment les opérateurs **SIGFOX, LORA** pouvant couvrir des dizaines de kilomètres. En général, les longues portées sont utilisées par les entreprises pour connecter des infrastructures distantes d'Internet ou pour les projets de **villes intelligentes**.

Dans le cadre du projet de villes intelligentes, nous pouvons citer la technologie **White Space TV** orientée uniquement pour l'IoT [Composants RS Allied Electronics, 2015].

I.6.2 Réseaux courtes distances

Pour les réseaux de communication de courte distance, nous avons le Wi-Fi, le Bluetooth qui sont déjà connus. Mais à côté, il y a des opérateurs privés qui ont créé leur propre réseau de communication comme le **Z-wave** réservé à la domotique.

C'est une technologie sans-fil, bien pratique pour les domiciles. Il peut couvrir un rayon d'environ 30 mètres. Il se base sur la technique du réseau maillé où les objets connectés peuvent échanger les données entre eux et aussi vers le système émetteur ou la station de base. Dans une telle situation, les objets connectés sont reliés au secteur.

Le nouveau Bluetooth (**BLE : Bluetooth Low-Energy**) ou **Bluetooth Smart** est propice pour le transfert de petites données, il est beaucoup utilisé par les smartphones. Il consomme moins d'énergie que Z-wave, car il tourne, généralement, avec des batteries incorporées et lorsqu'il ne transmet pas les objets connectés, il est en mode veille. Cela contribue à une longue vie de la batterie.

En fonction d'un certain nombre de facteurs, notamment la portée, la durée de vie, la puissance d'utilisation de la batterie, le niveau de sécurité des données à transmettre et des applications, on pourrait faire un seul choix ou une combinaison de technologies.

I.6.3 Protocoles pour l'Internet des objets (IoT)

a- Standard ZigBee

A l'instar du Bluetooth, le standard ZigBee dispose d'une importante base d'exploitation installée, surtout en milieu industriel. Parmi les profils ZigBee disponibles, ZigBee PRO et ZigBee Remote Control (RF4CE) reposent sur la norme IEEE802.15.4 ; Fonctionnant à 2,4 GHz, cette technologie de réseau sans fil standard de l'industrie, cible les applications nécessitant des échanges de données, relativement peu fréquents, à de faibles vitesses de transmission sur un espace restreint et ayant une portée de 100 m (résidence ou bâtiment, par exemple). Associant fonctionnement à faible consommation, haute sécurité, robustesse et grande évolutivité avec un nombre important de nœuds, ZigBee/RF4CE présente d'importants avantages dans les

systèmes complexes. Ce protocole est, par ailleurs, en position idéale pour tirer le meilleur parti du contrôle et des réseaux de capteurs sans fil dans les applications M2M (abréviation de Machine To Machine) et IoT.

Norme : ZigBee 3.0 basé sur IEEE802.15.4

- ❖ Fréquence : 2,4 GHz
- ❖ Portée : 10-100 m
- ❖ Vitesses de transmission : 250 Kbit/s

b- Bluetooth Low-Energy (BLE)

Bluetooth Low-Energy est beaucoup utilisé. La plupart des smartphones sont dotés de cette technologie. Il a une portée qui atteint 60m en visibilité directe. Il consomme moins d'énergie que le Wifi. Sa dernière version a une portée encore plus supérieure et mieux adaptée pour les objets connectés. Il a un débit plus faible que celui du WIFI. C'est une technologie de communication de courte portée qui opère dans la bande de 2.4 GHz et a une portée qui peut atteindre, désormais, 150m avec un débit de 1Mbits/s. Le ZigBee opérant dans la même bande de fréquence peut atteindre 100m de portée avec un débit de 250 Kbits/s.

- ❖ Norme : la spécification fondamentale de Bluetooth 4.2
- ❖ Fréquence : 2,4 GHz (ISM)
- ❖ Portée : 50-150 m (Smart/BLE)
- ❖ Vitesses de transmission : 1 Mbit/s (Smart/BLE)

c- Technologie Z-Wave

Z-Wave est une technologie de télécommunications RF à faible consommation, principalement conçue pour la domotique et les produits tels que les contrôleurs de lampe ou les capteurs. Optimisée pour une communication fiable et à faible latence de petits paquets de données avec une vitesse de transmission pouvant atteindre 100 Kbit/s, elle fonctionne dans la bande Sub-GHz et offre une résistance aux interférences causées par le Wi-Fi et les autres technologies sans fil dans la plage de 2,4 GHz, telles que le Bluetooth ou ZigBee. Cela permet de contrôler jusqu'à

232 circuits. Elle est très évolutive et prend en charge les réseaux Full Mesh sans recours à un nœud coordinateur.

Z-Wave utilise un protocole plus simple que d'autres technologies, offrant un développement plus rapide et plus facile. Cela étant, elle ne peut compter que sur un seul fabricant de circuits, Sigma Designs, contre plusieurs sources pour d'autres technologies sans fil telles que ZigBee, notamment :

- ❖ Norme : Z-Wave Alliance ZAD12837/ITU-T G.9959 ;
- ❖ Fréquence : 900MHz (ISM) ;
- ❖ Portée : 30 m ;
- ❖ Vitesses de transmission : 9,6 / 40 / 100 Kbit/s.

d- Système 6LowPAN

6LowPAN (IPv6 Low-power Wireless Personal Area Network) est une technologie IP majeure. Comparativement au Bluetooth ou ZigBee, 6LowPAN n'est pas une technologie de protocoles pour applications IoT, mais un protocole de réseau qui définit les mécanismes d'encapsulation et de compression d'en-têtes. Permettant, ainsi, de choisir la bande de fréquence et la couche physique, cette norme peut aussi être utilisée sur différentes plates-formes de communications, surtout Ethernet, Wi-Fi, 802.15.4 et la bande ISM Sub-GHz.

L'un de ses attributs clés est la pile IPv6 (Internet Protocol version 6), qui a apporté une contribution capitale à la naissance de l'IoT au cours de ces dernières années. IPv6 est le successeur d'IPv4 et offre environ 5×10^{28} adresses à chaque personne dans le monde. Ainsi, il permet d'attribuer à tout objet ou circuit intégré dans le monde une adresse IP spécifique et une connexion à Internet.

Spécialement conçu pour la domotique et l'automatisation de la construction, entre autres, IPv6 offre un mécanisme de transport de base permettant la production de systèmes de commande complexes et la communication économique avec les circuits, via un réseau sans fil à faible consommation.

Conçue pour l'envoi de paquets IPv6 sur des réseaux IEEE802.15.4 et la mise en œuvre de normes IP ouvertes dont TCP, UDP, HTTP, COAP, MQTT et la technologie Web

Socket, cette norme offre des nœuds adressables, de bout en bout, permettant à un routeur de se connecter au réseau via IP.

6LowPAN est un réseau maillé associant robustesse, évolutivité et autoréparation. Les circuits de routeurs maillés peuvent acheminer les données à destination d'autres circuits, tandis que les hôtes peuvent rester en veille durant de longues périodes :

- ❖ Norme : RFC6282 ;
- ❖ Fréquence : (adaptée et utilisée sur une variété d'autres médias de mise en réseau, dont Bluetooth Smart (2,4 GHz), ZigBee ou RF à faible consommation.

e- Protocole Thread

Thread est un tout nouveau protocole de réseau IPv6 basé sur IP, destiné à l'environnement domotique. Basé sur 6LowPAN et similaire à cette technologie, Thread n'est pas un protocole d'application IoT comme le Bluetooth ou ZigBee.

Cependant, d'un point de vue applicatif, cette technologie est, avant tout, conçue comme un complément au Wi-Fi. En effet, bien que reconnaissant tous les atouts du Wi-Fi pour nombre de circuits grand public, elle connaît des limites dans le contexte de la domotique.

Lancé à la mi-2014 par le Thread group, ce protocole sans redevance est basé sur différentes normes dont IEEE802.15.4 (comme interface radio sans fil), IPv6 et 6LoWPAN, et il offre une solution IP résiliente pour l'IoT. Conçu pour fonctionner sur les appareils à base de silicium sans fil IEEE802.15.4 proposés par des fournisseurs tels que Freescale et Silicon Labs, Thread prend en charge un réseau maillé articulé sur des transcepteurs radio IEEE802.15.4 et peut gérer jusqu'à 250 nœuds avec des niveaux élevés d'authentification et de codage.

Une mise à niveau logicielle, relativement simple, devrait permettre aux utilisateurs d'exécuter Thread sur les circuits IEEE802.15.4 existants.

- ❖ Norme : Thread, basée sur IEEE802.15.4 et 6LowPAN ;
- ❖ Fréquence : 2,4 GHz (ISM).

f- Near Field Communication (NFC)

NFC (Near Field Communication) est une technologie favorisant des interactions bidirectionnelles simples et sûres entre deux dispositifs électroniques (les smartphones en particulier), pour permettre aux consommateurs d'effectuer des transactions par paiement sans contact, d'accéder à des contenus numériques et de se connecter à des dispositifs électroniques.

Son action principale consiste à étendre les fonctionnalités de la technologie de carte sans contact, pour permettre aux dispositifs de partager des informations à une distance inférieure à 4 cm :

- ❖ Norme : ISO / CEI18000-3 ;
- ❖ Fréquence : 13,56MHz (ISM) ;
- ❖ Portée : 10 cm ;
- ❖ Vitesse de transmission : 100 – 420 Kbit/s.

g- Norme Sigfox

Autre technologie à longue portée, Sigfox s'insère entre les technologies Wi-Fi et cellulaire en termes de portée. Elle utilise les bandes ISM qui peuvent être utilisées gratuitement sans licence, pour transmettre des données sur un spectre très étroit, à partir et à destination d'objets connectés.

Sigfox repose sur l'idée suivante : pour de nombreuses applications M2M fonctionnant sur une petite batterie et se contentant de transferts de données très limités, la portée du Wi-Fi est trop courte, tandis que celle de la technologie cellulaire est trop coûteuse et énergivore. Faisant appel à la technologie UNB (Ultra Narrow Band - À bande très étroite), Sigfox est, uniquement, conçu pour gérer des vitesses de transfert de données assez basses, de 10 à 1.000 bits par seconde. Sa consommation est limitée à 50 microwatts seulement, contre 5 000 microwatts pour la communication cellulaire. Ce protocole peut aussi offrir une durée de veille type de 20 ans avec une batterie 2,5 Ah, contre 0,2 an seulement pour la communication cellulaire.

Déjà activé pour des dizaines de milliers d'objets connectés, le réseau est déjà en déploiement dans les grandes villes d'Europe dont dix au Royaume-Uni. Associant robustesse, efficacité et évolutivité, le réseau permet de connecter des millions de circuits alimentés par batterie sur des zones de plusieurs kilomètres carrés.

Cette distance est idéale pour différentes applications M2M, qui devraient comprendre les objets suivants : compteurs intelligents, moniteurs de patients, dispositifs de sécurité, éclairage de rue et capteurs d'environnement. Le système Sigfox utilise du silicium avec, notamment, les transepteurs sans-fil EZ RadioPro de Silicon Labs, qui offrent des résultats excellents, une portée étendue et une consommation ultra-faible pour les applications réseau sans fil, fonctionnant dans la bande Sub-GHZ :

- ❖ Norme : Sigfox ;
- ❖ Fréquence : 900 MHz ;
- ❖ Portée : 30-50 km (environnements ruraux), 3-10 km (environnements urbains) ;
- ❖ Vitesses de transmission : 10 -1000 bit/s.

h- Norme Neul

Reposant sur le même concept que Sigfox et fonctionnant dans la bande Sub-GHZ, Neul exploite de très petites couches du spectre TV White Space pour offrir des réseaux sans fil économiques associant une grande évolutivité, une couverture élevée et une faible consommation.

Les systèmes sont articulés sur le processeur IcenI, qui fait appel à White Space pour les communications, afin d'accéder au spectre UHF de haute qualité, désormais disponible suite au passage de la TV analogique à la TV numérique. La technologie de communication Weightless est une nouvelle technologie de réseau étendu sans fil conçue pour l'IoT, majoritairement en concurrence avec les solutions GPRS, 3G, CDMA et LTE WAN existantes. Les vitesses de transmission vont de quelques bits par seconde à 100 Kbit/s sur la même liaison simple. La consommation des circuits peut aller de 20 à 30 mA avec une alimentation sur 2 piles AA, soit 10 à 15 ans sur le terrain :

- ❖ Norme : Neul ;
- ❖ Fréquence : 900 MHz (ISM), 458 MHz (UK), 470-790 MHz (White Space) ;
- ❖ Portée : 10 km ;
- ❖ Vitesse de transmission : de quelques bit/s à 100 Kbit/s.

i- Réseau LoRaWAN

Similaire, à certains égards, à Sigfox et à Neul, LoRaWAN cible les applications de réseau étendu (WAN) et est conçu pour fournir des réseaux étendus à faible consommation dont les fonctionnalités sont indispensables à la communication bidirectionnelle sécurisée mobile à faible coût dans les applications urbaines et industrielles intelligentes, ainsi que IoT et M2M. Optimisées pour une faible consommation et prenant en charge de grands réseaux comprenant plusieurs millions de circuits, les vitesses de transmission vont de 0,3 Kbit/s à 50 Kbit/s :

- ❖ Norme : LoRaWAN ;
- ❖ Fréquence : variable ;
- ❖ Portée : 2-5 km (environnement urbain), 15 km (environnement suburbain) ;
- ❖ Vitesses de transmission : 0,3-50 Kbit/s.

j- Réseau WI-FI

Compte tenu de l'omniprésence du Wi-Fi dans l'environnement domotique au sein des réseaux locaux, la connectivité Wi-Fi s'impose, souvent, comme le choix évident pour beaucoup de développeurs. Elle ne nécessite pas de longues explications, sauf pour rappeler l'évidence, à savoir la vaste infrastructure existante, le transfert de données rapide et la possibilité de gérer de grandes quantités de données.

A l'heure actuelle, la 802.11n s'impose comme la norme Wi-Fi la plus utilisée dans le contexte privé et professionnel. Cette norme offre un débit élevé, de l'ordre de centaines de mégabits par seconde, idéal pour les transferts de fichiers, mais trop énergivore pour la plupart des applications IoT.

- ❖ Norme : basée sur 802.11n (actuellement la norme la plus utilisée pour un usage privé) ;
- ❖ Fréquence : bande de 2,4 GHz et 5 GHz ;

- ❖ Portée : environ 50 m ;
- ❖ Vitesse de transmission : 600 Mbit/s maximum, mais la vitesse habituelle est proche de 150 Mbit/s, en fonction de la fréquence de canal utilisée et du nombre d'antennes (la dernière norme 802.11-ac devrait permettre une vitesse pouvant atteindre 500 Mbit/s à 1 Gbit/s).

k- Technologie cellulaire

Toute application IoT nécessitant un fonctionnement sur de plus longues distances peut favoriser des capacités de communication cellulaire GSM/3G/4G. Bien que la communication cellulaire (4G en particulier) puisse envoyer de grandes quantités de données, elle implique aussi des coûts et une consommation électrique excessifs pour de nombreuses applications.

Elle peut, cependant, être idéale pour les projets basés sur un capteur et qui, ne nécessitant qu'une faible bande passante, enverront de très faibles quantités de données sur Internet. La gamme de produits **SparqEE** joue un rôle essentiel dans ce secteur, avec la carte de développement économique CELLv1.0 très compacte, de même qu'une série de cartes de connexion de Shield destinées aux plates-formes Raspberry Pi et Arduino.

- ❖ Norme : GSM/GPRS/EDGE (2G), UMTS/HSPA (3G), LTE (4G) ;
- ❖ Fréquences : 900 / 1 800 / 1 900 / 2 100 MHz ;
- ❖ Portée : 35 km max pour GSM ; 200 km max pour HSPA ;
- ❖ Vitesse de transmission (standard en téléchargement) : 35-170 Kbit/s (GPRS), 120-384 Kbit/s (EDGE), 384 Kbit/s-2 Mbit/s (UMTS), 600 Kbit/s-10 Mbit/s (HSPA), 3-10 Mbit/s (LTE).

I.6.4 Comment choisir un réseau adapté à ses besoins ?

Les objets connectés forment une famille, extrêmement, diversifiée, en expansion permanente. La diversité des technologies de radiocommunication répond à l'hétérogénéité du parc mondial d'objets communicants :

- ❖ la pluralité des usages : Domotique, maintenance prédictive, téléphonie,

transfert et traitement de données, etc. ;

- ❖ la pluralité des publics visés : Consommateurs résidentiels ou industriels, collectivités locales, etc. ;
- ❖ la pluralité des réglementations : Bandes de fréquences d'utilisation libre ou sous licence, etc. Le tableau 1.1 fait une étude comparative des distances entre différentes technologies.

TABLEAU 1.1: DIFFERENTES PORTEES DES TECHNOLOGIES[COMMISSION DE REGULATION DE L'ENERGIE (CRE)]

	Courte portée			Moyenne portée			Longue portée	
Technologie	NFC	Bluetooth	Zigbee	Z-Wave	Wi-Fi	BLE	SigFox	LoRa
Portée moyenne (en intérieur)	<10 cm	10 m	10 m	50 m	50 m	50 m	>2km	>2km
Débit (Mbit/s)	1.10^{-5}	1.10^{-3}	1.10^{-2}	1.10^{-2}	1.10^2	1.10^{-3}	1.10^{-3}	1.10^{-3}
Autonomie	Mois	Jours	Années	Années	Jours	Mois	Années	Années
Fréquence	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz 868 MHz	868 MHz	2,4 GHz 5 GHz	2,4 GHz	868 MHz	868 MHz
Usages	Téléphonie Cartes de paiement	Périphériques informatiques et multimédia	Domotique	Navigation Internet Transferts conséquents de données	Périphériques informatiques et multimédia	Prévention d'incidents Collecte de données Gestion de réseaux		

parc d'objets communicants en fonction d'un certain nombre de critères, notamment techniques, tels que la portée, le débit et l'autonomie, c'est-à-dire la consommation électrique des objets connectés. La figure 1.9 fait une comparaison de débits entre les différentes technologies.

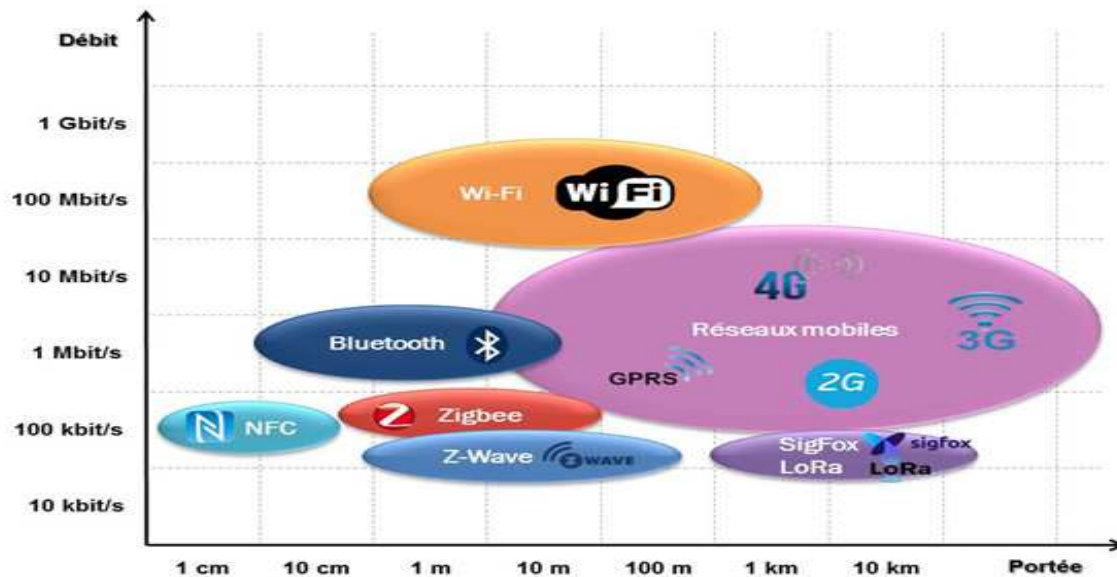


FIGURE 1.10 : COMPARAISON DES TECHNOLOGIES POUR L'INTERNET DES OBJETS[CRE]

Les besoins en termes de réseaux de communication évoluent sans cesse, au rythme de l'apparition de nouveaux besoins. Ainsi, si l'accent a longtemps été mis sur l'augmentation du débit, peut-être, parfois, au détriment de la portée, de nouvelles technologies de radiocommunication mettent en avant leur caractéristique longue portée et bas débit.

Sans leur fonctionnement, les réseaux de type SigFox ou LoRa ont su identifier un nouveau marché pour les opérateurs de réseaux appelés à gérer un réseau de capteurs très étendus et peu énergivores. En sus, la multiplicité des réseaux de communication pose le problème de leur compatibilité avec les objets connectés et, plus généralement, de l'interopérabilité entre les objets connectés n'utilisant pas les mêmes protocoles de communication.

I.7 Représentation graphique d'un RCSF

Un réseau de capteurs sans fil peut être représenté de la manière suivante :

Soit un graphe $G = (V, E)$ représentant le RCSF, avec V l'ensemble des nœuds et E est inclus dans V^2 les arcs donnant les communications directes possibles : (u, v)

appartient à E si et seulement si u peut envoyer directement un message à v (on dit alors que v est voisin de u).

Les couples appartenant à E dépendent de la position des nœuds et de leur portée de communication. Nous prenons l'hypothèse que la portée R de chaque nœud est identique. Soit $d(u, v)$ la distance entre les nœuds u et v . l'ensemble E peut être défini comme suit:

$$E = \{(u, v) \in V^2 : \text{dist}(u, v) < R\} \quad (1.1)$$

Ce graphe est connu sous le nom de graphe disque unitaire, avec R comme rayon de transmission.

Dans ce graphe, $G = (V, E)$ nous définissons $n = |V|$ comme le nombre de nœuds dans le réseau. Le voisinage $N(u)$ d'un nœud u représente l'ensemble des nœuds voisins de u , défini par $\{v \in V : (u, v) \in E\}$.

Un graphe G est dit à k -(arc) connecté s'il y a au moins k disjoint chemin entre deux nœuds quelconques, v appartient V .

La connectivité est une mesure de tolérance aux fautes ou de diversité de chemins dans le réseau. La connectivité est une condition fondamentale pour que le réseau soit opérationnel.

En effet, la connectivité d'un réseau s'exprime de la façon suivante:

$$\mu(R) = \frac{N \cdot \pi \cdot R^2}{A} \quad (1.2)$$

Où :

- R portée d'un nœud.
- N le nombre de nœuds situés dans l'aire A .
- A l'aire de calcul.

La figure 1.11 illustre la portée radio des nœuds.

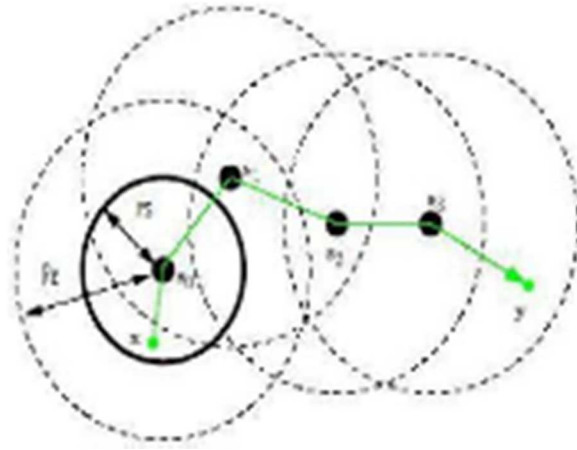


FIGURE 1.11: PORTEE DE LA RADIO DES NŒUDS [SALHEDDINE KABOU, 2010, P46]

La couverture

Au sein du RCSF, chaque nœud capteur a une certaine vue sur l'environnement à surveiller pour un rayon d'environ 10 mètres. En fonction de la zone à couvrir, il est impératif de faire un bon calcul de dimensionnement pour avoir le nombre de nœuds capteurs qu'il faut pour couvrir ce périmètre. A cet effet, il est important de prévoir une marge 10% de nœuds capteurs en plus certains qui pourraient ne pas fonctionner lors de l'installation. Ce qui fait que pour un déploiement efficace et une bonne connectivité, il faudrait un bon planning de dimensionnement de ces nœuds capteurs.

Cela démontre que la couverture de zone est aussi un paramètre important dont on doit tenir compte dans la conception du réseau de capteurs sans fil.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à l'étude des réseaux de capteurs sans-fil, avons posé également les balises de base et fédéré quelques concepts nécessaires à la compréhension de nos problématiques dans la suite de ce travail. Cela fait des années que les réseaux de capteurs sans-fil suscitent un engouement important dans la recherche. Nous avons remarqué à travers nos lectures que minimiser la consommation d'énergie d'un nœud capteur est le cheval de bataille de toutes les solutions et de protocoles proposés.

CHAPITRE II : ETAT DE L'ART

Introduction

Pour assurer le passage à l'échelle, des protocoles de routage hiérarchique et garantir plus d'économie en énergie pour augmenter la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil, la hiérarchisation virtuelle des réseaux peut être adoptée. Cela consiste à regrouper les nœuds en groupes dit clusters où chaque cluster est représenté par un nœud capteur leader appelé Cluster Head, dont le choix se base sur plusieurs critères à savoir l'identifiant, la distance vers la station de base, l'énergie résiduelle, etc. Cette technique est appelée Clustering. Une autre structure utilisée est la chaîne. Le principe d'une chaîne est qu'un nœud capteur ne peut communiquer qu'avec deux voisins. Nous trouvons aussi des structures qui combinent les groupes et les chaînes. En se basant sur une architecture hiérarchique, plusieurs protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans-fil ont été proposés. Dans ce chapitre, nous nous intéressons dans un premier temps aux différentes approches proposées pour le routage hiérarchique de données sur les réseaux de capteurs sans-fil et dans un deuxième temps sur les travaux existants sur l'économie d'énergie dans les RCSFs.

II.1 Définition

Le clustering : Le clustering est une technique pour partitionner le réseau en groupes (clusters), sachant que pour chaque groupe est désigné un leader (Cluster Head), ce dernier communique avec les membres de son groupe et les Cluster Head des autres groupes de cette manière l'opération de clustering contribue considérablement à l'économie de l'énergie, à la réduction de la complexité des protocoles de routage, et à la résistance au facteur d'échelle. L'agrégation de données permet d'éliminer la redondance de données et d'envoyer les informations utiles.

- ❖ **Un nœud capteur** : Le nœud capteur est le composant clé du réseau c'est lui qui s'occupe du captage, du stockage, de la conduite des données et de leur traitement, cela dépend de sa capacité en terme de calcul et de puissance énergétique et aussi le mécanisme d'affectation des rôles selon le protocole de clustering à adopter.

- ❖ **Un cluster** : Le cluster est un ensemble de nœuds capteurs qui forme l'unité d'organisation d'un réseau de capteurs, la nature dense de ces réseaux exige la décomposition en cellules afin de simplifier les tâches de communication et répondre aux différentes contraintes.
- ❖ **Un Cluster Head** : Nécessaire pour organiser l'activité des clusters, il représente le chef du groupe appelé aussi le leader, ses tâches sont diversifiées tels que l'organisation de la communication inter-clusters et intra-clusters, l'agrégation de données, il est désigné au sein d'un ensemble de nœuds capteurs ou bien pré-assignés par le concepteur du réseau. Il peut être ordinaire comme les autres nœuds capteurs ou bien doté de plus d'énergie.
- ❖ **Une station de base** : Elle se situe au niveau supérieur de la hiérarchisation d'un réseau de nœuds capteurs, elle fournit une connexion entre le réseau et l'utilisateur finale.

II.2 Caractéristiques d'un protocole de routage hiérarchique

Un protocole de routage hiérarchique doit spécifier plusieurs tâches que nous pouvons classer selon :

- **L'algorithme de Clustering utilisé**

Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature, il existe trois types :

❖ **Centralisé**

L'algorithme est exécuté sur le nœud capteur qui a une vue globale du réseau, généralement au niveau de la station de base. Ce type d'algorithme est peu utilisé à cause de l'over Head généré suite aux transmissions exécutées pour pouvoir garder la vue globale du réseau et la dynamique variable de la topologie.

❖ **Distribué**

L'algorithme est exécuté en coopération au niveau de chaque nœud capteur du réseau. La synchronisation des tâches de contrôle est obtenue en échangeant des messages de contrôle. Ce type d'algorithme minimise la communication relative à la sauvegarde de

la vue globale du réseau, car chaque nœud capteur décide, indépendamment des autres, de son rôle de faire connaître sa décision par l'envoi de message. Cependant, l'efficacité de ces algorithmes dépend de la taille et du nombre de messages de synchronisation.

II.3 Election des Clusters Head

Le nœud capteur Cluster Head consomme plus d'énergie par rapport aux autres nœuds capteurs du réseau. Le Cluster Head coordonne le fonctionnement des autres nœuds capteurs membres de son cluster et agrège leurs données. De ce fait, il dissipe plus d'énergie créant un déséquilibre de la distribution de l'énergie sur le réseau. Pour pallier à ce problème, une rotation de ce rôle de Cluster Head est organisée au sein du cluster ou au sein du réseau entier. La rotation est effectuée périodiquement ou en fonction de la consommation de l'énergie du nœud Cluster Head.

II.3.1 Communication intra-Cluster

La communication entre le nœud capteur Cluster Head (CH) et les autres membres du cluster peut se faire, soit en un seul saut ou en plusieurs sauts. Dans le cas d'une communication direct (en un saut), les paquets de données sont envoyés directement au Cluster Head. Cela suppose que les nœuds capteurs membres sont capables d'atteindre le CH en utilisant une transmission assez puissante pour une bonne réception de données. Ce type de communication engendre une consommation importante d'énergie si la distance, entre le CH et les autres nœuds capteurs est grande. Pour réduire la consommation d'énergie, une communication en plusieurs sauts, de petites distances est utilisée. Dans ce cas chaque membre du cluster envoie ses données au plus proche membre de son cluster jusqu'à l'aboutissement au CH. Ce type de communication est souvent utilisé pour réduire le nombre de collisions. On trouve aussi des techniques employées au niveau MAC pour garantir un accès équitable et sans erreur à savoir, CDMA (Code Division Multiple Access) en utilisant un code pour chaque cluster, TDMA (Time Division Multiple Access) en allouant pour chaque nœud du cluster un temps spécifique (dit Frame) pour envoyer ses données ou bien, FDMA

(Frequency Division Multiple Access) où chaque nœud capteur utilise une fréquence spécifique pour l'envoi de données.

II.3.2 Communication inter-Cluster

Les Cluster Head communiquent avec la station de base soit directement, soit en deux ou plusieurs sauts via des nœuds appelés généralement des " Nœud Gateway ". Ces nœuds peuvent être des CH ou bien des nœuds membres d'un cluster. L'utilisation de la communication en multi-sauts permet de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter l'évolutivité du réseau

II.3.3 Niveau d'agrégation des données

Selon le type de nœud capteur utilisé, l'agrégation de données peut se faire à chaque nœud capteur du réseau ou uniquement au niveau des Cluster Head. L'agrégation des données permet de réduire la taille des données échangées entre les nœuds capteurs. Ce qui permet de réduire l'énergie dépensée. Plusieurs techniques d'agrégation sont utilisées à savoir des fonctions élémentaires comme la somme, la moyenne, l'écart type, etc. ou bien des fonctions plus complexes spécifiques aux applications utilisées.

II.4 Protocole de routage hiérarchique

II.4.1 LEACH-R (low-energy Adaptive Clustering Hierarchy with relay)

Ce protocole est une amélioration de LEACH, il est composé aussi de deux phases cependant la probabilité de sélection de clusters Head a été améliorée en rajoutant un seuil pour l'énergie résiduelle. Il calcule aussi la portée du nœud capteur R pour chaque CH, ainsi le nœud capteur relaie qui a la plus grande valeur sera responsable de communiquer les données à la station de base.

Discussion

L'ajout d'un seuil pour la probabilité de sélection de CH assure que seuls les nœuds capteurs avec une grande énergie résiduelle ont la chance d'être élu comme CH, ce qui assure l'équilibrage énergétique du réseau. Aussi l'ajout du nœud capteur R résout le problème des nœuds éloignés de la station de base. Cependant LEACH-R souffre du problème du point chaud à cause de la surcharge du nœud capteur R parce que tout le trafic du réseau destiné à la station de base passe par ce dernier.

II.4.2 PEGASIS (Power Efficient Gathering Sensor Information System)

Des chercheurs ont proposé une version améliorée de LEACH appelée PEGASIS [45], dont l'idée principale est de former une chaîne entre les nœuds afin que chaque nœud capteur reçoit et communique à un voisin proche. Les données collectées sont transmises d'un nœud capteur à un autre qui les agrège jusqu'à ce qu'elles arrivent à un nœud capteur particulier qui les transmet à la station de base. Les nœuds capteurs qui transmettent les données à la station de base, sont choisis tour à tour selon une politique Round-Robin, dont le but est de réduire l'énergie moyenne dépensée par un nœud capteur durant un round. Contrairement à LEACH, PEGASIS évite la formation des clusters et confère à un seul nœud capteur dans la chaîne, l'envoi de données à la station de base.

Discussion

Les résultats de la simulation ont montré que PEGASIS prolonge la durée de vie du réseau et ceux en diminuant le surcoût causé par le processus de formation de clusters dans LEACH, et en diminuant le nombre de transmissions et de réceptions en employant l'agrégation de données. Cependant, ce protocole est adapté seulement aux capteurs sans-fil dont les nœuds capteurs sont immobiles. Il ne gère pas l'évolutivité en plus du problème du point chaud.

II.4.3 TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network)

Ce protocole a été proposé par *Manjeshwar* et *Agarwal* pour les applications critiques où le changement de certains paramètres peut être brusque. TEEN utilise la même stratégie que LEACH pour l'étape de formation de clusters en plus des niveaux, mais adopte une approche différente pour la phase de transmission des données où chaque CH envoie à ses membres deux seuils : un seuil Hard HT (hard threshold), qui est la valeur seuil du paramètre contrôlé (surveillé) et un seuil Soft ST (soft threshold) représentant une petite variation ou changement de la valeur du paramètre contrôlé. Si la valeur captée dépasse le seuil HT pour la première fois elle est stockée dans une variable SV et elle est transmise par le CH au nœud capteur concerné. Si la valeur captée dépasse la valeur stockée par une magnitude ST le nœud capteur décide de la transmettre et stocke cette nouvelle valeur dans son cache pour les comparaisons ultérieures.

Discussion

TEEN est un protocole adéquat aux applications critiques en termes de temps, il consomme moins d'énergie puisque le nombre de messages transmis est réduit et le seuil soft peut être changé selon les besoins. Cependant l'inconvénient principal de ce protocole est que, si les seuils HT et ST ne sont pas atteints, les nœuds capteurs ne communiqueront jamais, et aucune donnée ne sera transmise à l'utilisateur. La station de base ne connaît pas les nœuds capteurs qui ont épuisé leur énergie.

II.4.4 APTEEN (Adaptive Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol).

Pour y remédier aux limitations de TEEN, les auteurs ont proposé une amélioration Appelée APTEEN qui est un protocole hybride et qui change la périodicité et les valeurs seuils utilisées dans TEEN selon les besoins de l'utilisateur et le type d'application. Dans APTEEN, les CH transmettent à leurs membres les paramètres suivants :

- ❖ L'ensemble de paramètres physiques auxquels l'utilisateur est intéressé pour obtenir des Informations.

- ❖ Les seuils : seuil Hard HT et seuil Soft ST.
- ❖ Un Schedule TDMA permettant d'assigner à chaque nœud capteur un intervalle de temps appelé slot.
- ❖ Un compteur de temps (CT) : c'est la période de temps maximum entre deux transmissions Successives d'un nœud capteur. Dans APTEEN, les nœuds capteurs surveillent en continu l'environnement. Ils détectent une valeur d'un paramètre qui dépasse le seuil HT, ils transmettent leurs données. Une fois qu'un nœud capteur détecte une valeur qui dépasse HT, il ne transmet les données au Cluster Head que si la valeur de ce paramètre change d'une quantité égale ou plus supérieure à ST. Si un nœud capteur ne transmet pas de données pendant une période de temps CT, il doit faire une capture de données et les retransmettre.

Discussion

En permettant à l'utilisateur de choisir l'intervalle CT, APTEEN offre une grande flexibilité. En plus des seuils HT et ST qui offrent un contrôle de consommation d'énergie par la variation de ces paramètres. Cependant pour implémenter les fonctions de seuils et de périodes de temps CT, APTEEN exige une plus grande complexité. L'over Head et la complexité associée à la formation des clusters à plusieurs niveaux par TEEN et APTEEN sont assez élevés.

II.4.5 HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering)

Les auteurs de ont proposé un algorithme de clustering distribué appelé HEED pour les réseaux de capteurs sans-fil. Contrairement aux techniques précédentes, HEED ne fait aucune restriction sur la distribution et la densité des nœuds capteurs. Il ne dépend pas de la topologie du réseau ni de sa taille mais il suppose que les nœuds capteurs ont la possibilité de modifier leur puissance de transmission. HEED sélectionne les Cluster Head selon un critère hybride regroupant l'énergie restante des nœuds capteurs et un second paramètre tel que le degré des nœuds capteurs. Il vise à réaliser une distribution

uniforme des Clusters Head dans le réseau et à générer des clusters équilibrés en taille.

Un nœud capteur est élu comme Cluster Head avec une probabilité P_{ch} égale à :

$$P_{ch} = \frac{C_{Prob} \cdot E_n}{E_{Total}} \quad (2.1)$$

Où : E_n est l'énergie restante du nœud n.

E_{Total} est l'énergie globale dans le réseau

C_{prob} est le nombre optimal de clusters.

Cependant, l'évaluation de E_{Total} présente une certaine difficulté, à cause de l'absence de toute commande centrale. Un autre problème réside dans la détermination du nombre optimal de clusters. De plus, HEED ne précise pas de protocole particulier à utiliser pour la communication entre les Clusters Head et le Sink. A l'intérieur du Cluster, le problème ne se pose pas car la communication entre les membres du Cluster et le Cluster Head est directe (à un saut). D'autre part, avec HEED, la topologie en Clusters ne réalise pas de consommation minimale d'énergie dans les communications intra-cluster et les clusters générés ne sont pas équilibrés en taille.

Discussion

HEED distribue l'énergie de communication d'une manière uniforme Les CHs aussi sont distribués d'une façon meilleure à la différence de LEACH. Ce qui prolonge la connectivité du réseau. HEED souffre des messages d'over Head puisqu'il a besoin de plusieurs itérations pour la construction des clusters. Pour chaque itération plusieurs paquets sont émis sans oublier que la transmission de données qui s'effectue en un saut, engendre l'épuisement rapide des nœuds capteurs lointains de la station de base.

II.4.6 TLCP (Two-Level Cluster based Routing Protocol)

TLCP est un protocole de routage hiérarchique à deux niveaux, il améliore le protocole LEACH en améliorant le mécanisme de transmission de données, en sélectionnant des

CHs parmi les CHs des clusters, Ce protocole est exécuté en tour et chaque tour est divisé en deux phases :

- ❖ Phase d'installation : qui se compose aussi de deux phases.

1. La formation de clusters entre les nœuds capteur

Dans cette étape, chaque nœud décide de devenir un chef de cluster, en se basant sur le seuil $T(s_i)$ calculé par la formule :

$$T(s_i) = \begin{cases} \frac{P}{1-P(\text{rmod} \frac{1}{P})} * \frac{E_{res}(i)}{E_{init}} & \text{si } i \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.2)$$

Où P est le pourcentage désiré des Clusters Head (CH),

$E_{res}(i)$ est l'énergie résiduelle du nœud i ,

E_{ave} est l'énergie moyenne du réseau est le cycle actuel,

G est l'ensemble des nœuds capteurs qui n'ont pas été chefs de cluster dans les $1/P$ derniers cycles.

Cette décision est prise par les nœuds capteurs en choisissant un nombre aléatoire entre 0 et 1, Si le nombre est inférieur au seuil $T(s_i)$, Le nœud devient un Cluster Head pour le cycle actuel.

2. Formation de Clusters Head

Dans cette étape, les Clusters Head envoient leurs informations d'emplacement et d'énergie résiduelle à la station de base. Sur la base des informations reçues, cette dernière calcule le poids de chaque CH à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Weight}_{(CH_i)} = E_{res(i)} * \frac{1}{\text{dis}^2 \text{toBS}} \quad (2.3)$$

Puis elle sélectionne le nœud capteur avec le poids le plus élevé parmi les CHs comme CH de second niveau.

3. Phase de Steady-state

Une fois que les clusters sont établis, les nœuds capteurs transmettent leurs messages de données vers leurs CHs au cours de leur intervalle de temps de transmission TDMA alloué, chaque CH effectue l'agrégation des données collectées afin de réduire la quantité de données qui doit être envoyée au nœud capteur CH. Une fois la collecte des données et l'agrégation des données dans le dernier cycle sont terminées, la transmission des données dans le cluster de second niveau commence. Dans cette étape, le CH de second niveau crée l'intervalle TDMA et l'envoie aux CHs du cluster, ces derniers envoient leurs données agrégées au CH de cluster de second niveau au cours de leur intervalle de temps alloué, le CH de second niveau effectue l'agrégation des données, et les dirige vers la station de base par le CH qui a l'énergie résiduelle la plus élevée et la distance la plus courte de la station de base.

Discussion

Les résultats de simulation montrent que le protocole TLCP a une meilleure performance que le protocole LEACH. Le processus de sélection de CH à deux niveaux permet de minimiser la consommation énergétique et de prolonger la durée de vie du réseau, cependant le déploiement aléatoire des nœuds par une probabilité peut mener au problème des points isolés.

Le tableau 2.1 résume les différents protocoles et leurs caractéristiques.

**TABLEAU 2.1 – CLASSIFICATION DES PROTOCOLES DE ROUTAGE
HIERARCHIQUE**

	Référence	Mobilité	Localisation	Agrégation de données	QOS	Scalabilité
PEGASIS	[45]	nœuds fixes	Non	Distribué	Non	Limitée
LEACH-R	[49]	nœuds fixes	Non	Distribué	Non	Limitée
TEEN	[50]	nœuds fixes	Non	Centralisé	Non	Limitée
APTEEN	[46]	nœuds fixes	Non	Centralisé	Non	limitée
HEED	[51]	nœuds fixes	Non	Centralisé	Non	Bonne
TLCP	[52]	nœuds fixes	Oui	Centralisé	Non	Bonne

II.5 Travaux sur la minimisation d'énergie dans les RCSF

Nous nous sommes basé sur des références très récentes pour la rédaction de cette partie. Nous présentons dans les paragraphes qui suivent, une classification des différentes approches à minimisation d'énergie développées ces dernières années pour l'extension de la durée de vie d'un RCSF. La problématique autour de cette thématique a été, et restera toujours, une préoccupation très importante pour les chercheurs dans ce domaine. C'un élément fondamental dont il faut en tenir compte dans toute conception future d'un RCSF.

II.5.1 Classification générale

Dans les applications typiques des RCSF les nœuds capteurs, alimentés dans la plupart des cas par des sources d'énergie embarquées (les batteries), sont souvent nombreux (des centaines voire des milliers) et sont en général déployés dans des environnements lointains, non surveillés et hostiles.

Il devient par conséquent difficile, voire impossible de remplacer ou de recharger leurs batteries, source primordiale pour leur survie. Il apparaît donc que la métrique consommation de l'énergie, qui est visiblement un élément fondamental dans toute conception au sens large d'un RCSF, doit être impérativement optimisée. Les efforts de recherches qui sont déployés dans ce sens, se focalisent autour du concept de minimisation d'énergie.

La problématique autour de la minimisation d'énergie dans les RCSF vise essentiellement à réduire l'énergie dépensée au sein d'un nœud capteur (composants CPU, radio, ...) et au sein du réseau des nœuds capteurs en activité (protocoles réseau). Cela dans la perspective d'allonger considérablement la durée de vie du réseau. Les techniques de minimisation d'énergie citées dans la littérature sont classifiées en général, à un niveau d'abstraction plus élevé, en trois grandes classes: Approches basées sur le cycle d'activité, approches dirigées par les données et approches basées sur la mobilité Figure 2.1.

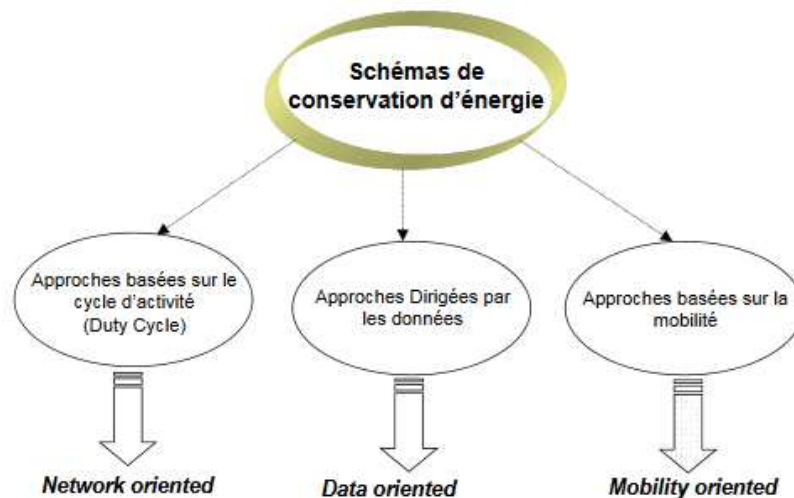


Figure 2.16 : Classification générale des approches d'économie d'énergie dans les RCSF

FIGURE 2.1 : CLASSIFICATION GENERALE DES APPROCHES D'ECONOMIE D'ENERGIE DANS LES RCSF

II.5.1.1 Approches basées sur le cycle d'activité

Ces approches connues dans la littérature anglaise sous le nom de 'Duty Cycling approaches', concernent essentiellement les sous-systèmes radio et de traitement qui font partie de l'architecture interne d'un nœud capteur. L'opération la plus efficace en termes de préservation d'énergie consiste à mettre en mode veille, le module radio chaque fois que la communication n'est pas nécessaire.

Lorsqu'il n'y a aucune donnée à envoyer ou à recevoir par le nœud capteur, le module de communication radio doit basculer vers le mode inactif et redeviendra actif chaque fois qu'il y a une présence d'une nouvelle donnée prête à être envoyée ou à recevoir. Le nœud capteur dans ce cas bascule dans le temps entre les états actif et inactif et développe ainsi un comportement appelé cycle d'activité.

Un cycle d'activité d'un nœud capteur est défini comme étant la fraction de temps durant laquelle ce nœud capteur est actif pendant sa durée de vie. Chaque nœud capteur dans un voisinage d'un RCSF effectue des tâches coopératives avec d'autres nœuds capteurs, ces tâches nécessitent une coordination efficace dans la gestion des différents cycles d'activités correspondants, i.e. les différents basculements veille/réveil (Sleep / Wake up).

Des mécanismes de planification des modes veille/réveil doivent impérativement accompagner toute approche basée sur le concept de cycle d'activité. Ceci assurera une faisabilité d'échange de données entre les nœuds capteurs du voisinage. Cependant, l'utilisation de ces mécanismes pose un problème de latence supplémentaire pour les applications des RCSF sensibles au délai, lorsqu'un nœud capteur se réveille après une longue période de veille.

II.5.1.2 Approches dirigées par les données

Dans ce cas, la stratégie de minimisation d'énergie est fondée sur la nature des données brutes collectées par les nœuds capteurs et aussi sur la manière avec laquelle ces

données sont collectées en présence d'un sous-système de capture fortement consommateur d'énergie.

En effet, les données brutes collectées par les nœuds capteurs d'un RCSF, notamment dans le cas des applications environnementales, ont souvent une forte corrélation spatiale et/ou temporelle. Ceci permet d'éviter une génération de données redondantes inutiles à transmettre au puits (Sink), car leur transmission implique un gaspillage d'énergie de communication même si on admet que le coût énergétique d'une collecte est négligeable.

De même, il existe actuellement des circuits capteurs spécifiques qui nécessitent une énergie non négligeable pour l'acquisition des données d'un phénomène. Si la collecte est réalisée sur une longue durée i.e. dans des intervalles de temps pouvant dépasser ceux des communications, alors dans ce cas on peut imaginer que ces capteurs sont capables d'atteindre un niveau de consommation énergétique, pouvant dépasser l'énergie consommée par le module radio.

Les techniques dirigées par les données doivent être ainsi conçues afin de réduire la quantité de données brutes prélevées par les capteurs, en assurant une qualité de capture d'un niveau acceptable vis-à-vis des objectifs de l'application considérée. Notons enfin que les techniques basées sur le cycle d'activité peuvent être aussi employées dans un processus de collecte de données.

II.5.1.3 Approches basées sur la mobilité

Dans le cas où certains nœuds capteurs (y compris le Sink) sont mobiles, i.e. dotés de modules de mobilité pour se déplacer dans l'espace de déploiement, la mobilité peut être exploitée pour réduire considérablement la consommation énergétique, en plus des deux techniques précédentes.

Lorsque ces nœuds capteurs mobiles sont excessivement chers, ils doivent exister en nombre très limité parmi les nœuds capteurs formant le réseau ou parfois attachés à des plates formes mobiles déjà présentes dans l'espace de déploiement. Comme

exemple, des soldats avec des applications militaires sur le terrain ou des animaux dans certains scénarios d'applications environnementales.

Certains travaux de recherches considèrent la mobilité comme un moyen efficace pour garantir la connectivité et maximiser la durée de vie du réseau. Le gain énergétique résultant de la mobilité des nœuds capteurs peut être justifié de différentes manières. En effet, dans un RCSF fortement statique, il apparaît souvent que certains chemins de routage multi-sauts subissent une surcharge de trafic par rapport à d'autres chemins pour transmettre les données entre les nœuds capteurs sources et le Sink.

Ce déséquilibre de charge affectera directement la durée de vie du réseau. De même, les nœuds capteurs les plus proches du Sink sont généralement les plus sollicités lors d'une opération de routage pour relayer les données vers le Sink. Ils seront ainsi plus affectés par le problème d'épuisement d'énergie (funneling effect). Si on imagine que certains nœuds capteurs (y compris le Sink) sont mobiles, le flux de trafic peut être altéré en affectant à ces nœuds capteurs mobiles la responsabilité de collecte directe des données à partir des nœuds capteurs statiques.

De cette manière, ces derniers attendent le passage du nœud capteur mobile pour lui transmettre les données à proximité (directement ou après un nombre très restreint de sauts). Ils peuvent ainsi préserver la consommation d'énergie gaspillée dans les cas suivants : utilisation des chemins plus longs, problème de contention, trop de messages de contrôle (over Head) pour le routage des données. En plus, les nœuds capteurs mobiles peuvent également parcourir le réseau afin d'assurer un équilibre de charge énergétique en termes de communication réseau.

II.5.1.4 Approches basées sur le cycle d'activité

Nous distinguons les approches de gestion de topologie et les approches de gestion de la puissance énergétique Figure 2.2. Dans la classe des approches de gestion de topologie, nous considérons deux sous classes selon qu'il s'agit de contrôler ou de configurer la topologie du réseau. Dans ce qui suit, nous développons les différentes

approches pour la préservation d'énergie figurant dans la hiérarchie illustrée par la Figure 2.2.

II.5.1.5 Contrôle de topologie

- ❖ Approches dirigées par la localisation
- ❖ Approches dirigées par la connectivité

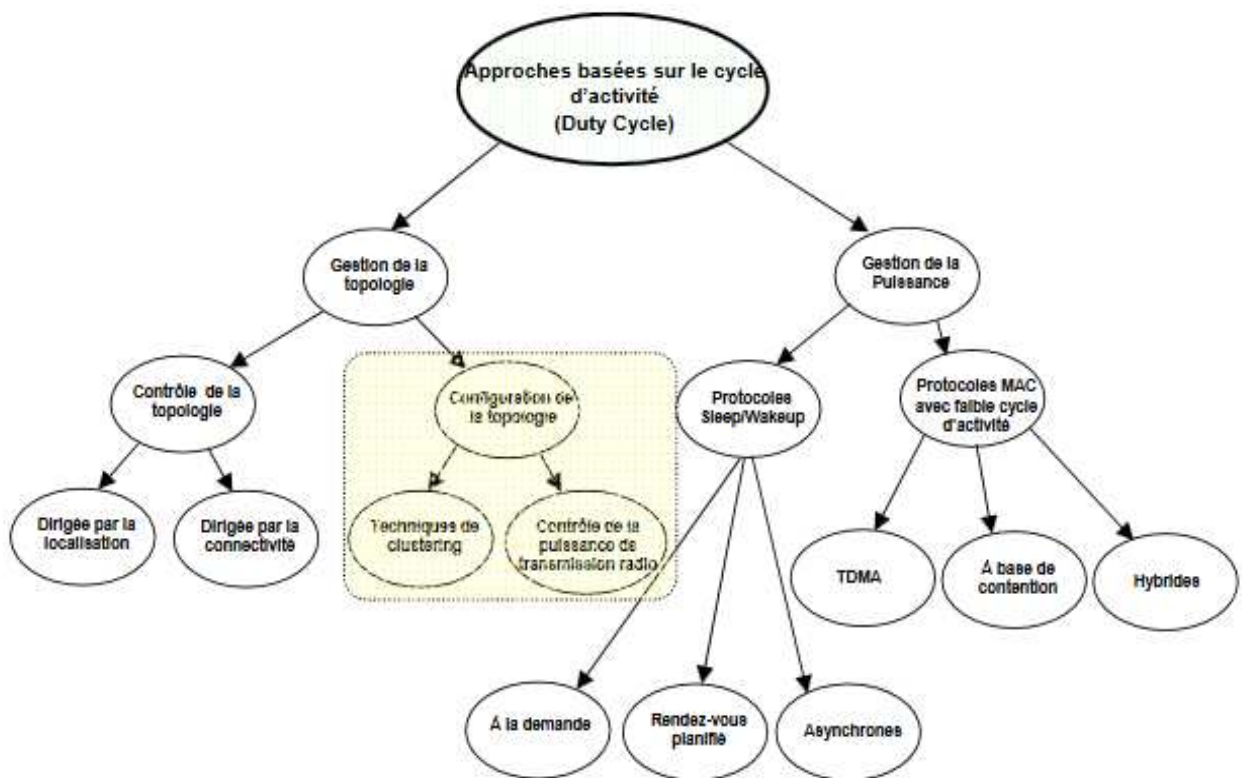


FIGURE 2.2 : CLASSIFICATION DES APPROCHES BASEES SUR LE CYCLE D'ACTIVITE

II.5.1.6 Configuration de la topologie

Les approches de configuration de la topologie pour la préservation d'énergie dans un RCSF sont fondées sur deux fonctions principales : reconfiguration du réseau en clusters pour favoriser des structures hiérarchiques et contrôle de la puissance de transmission radio d'un nœud capteur en activité. La préoccupation liée aux cycles d'activité est secondaire dans ce cas, mais peut être toujours couplée à une approche de configuration topologique. Notre proposition d'ajouter cette classe dans la hiérarchie est motivée par le fait qu'elle présente une forme particulière de gestion de topologie.

II.5.1.7 Protocoles Veille / Réveil (Sleep / Wake up)

Ces protocoles utilisent trois différentes approches qui sont :

- ❖ Approches à la demande
- ❖ Approches par rendez-vous planifié
- ❖ Approches asynchrones

II.5.1.8 Protocoles MAC avec faible cycle d'activité

La couche MAC (Medium Access Control) suscite beaucoup d'intérêt auprès des chercheurs, car elle soit à l'origine de différentes pertes d'énergie résumées comme suit :

Réception indésirable (overhearing) : Un nœud capteur reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. Ceci est dû essentiellement à la nature de la transmission radio qui est omni directionnelle obligeant chacun des nœuds capteurs du voisinage à gaspiller de l'énergie en recevant ces paquets.

Collision : Le canal radio est partagé par plusieurs nœuds capteurs, une collision aura lieu chaque fois que plus de deux nœuds capteurs tentent de transmettre simultanément leurs paquets. Les collisions augmentent à la fois la consommation d'énergie et la latence de délivrance des paquets.

Paquets de contrôle (over Head) : Les entêtes des paquets MAC et les paquets de contrôle utilisés pour les signalisations (RTS/CTS/ACK) ne contiennent pas les données propres à l'application et sont donc considérés comme des données supplémentaires (over Head). Ces paquets de contrôle peuvent être significatifs car la plupart des applications utilisent des paquets de données de taille très réduite.

Ecoute de la porteuse à vide (idle listening) : Un nœud capteur dans un état de non activité, écoute en permanence la porteuse pour savoir s'il est ou non récepteur d'un trafic éventuel. Dans cette situation, la quantité d'énergie dépensée est équivalente à une réception normale.

Non disponibilité du récepteur (over emitting) : Ce cas se produit lorsqu'un nœud capteur reçoit un paquet alors qu'il se trouve toujours en état de veille. Cette situation oblige l'émetteur à effectuer de nouvelles retransmissions afin de réussir sa transmission. Ces retransmissions, qui sont étroitement liées au problème de la synchronisation, consomment plus d'énergie.

Afin de diminuer, voir éliminer ces différentes sources de perte d'énergie, plusieurs protocoles ont été proposés. Ils sont répartis en deux grandes classes : Protocoles à base de TDMA (TDMA-based protocols) et Protocoles à base de contention (contention-based protocols).

Approches à base de TDMA : Ces protocoles dits planifiés ou déterministes, sont employés pour éviter d'une part les collisions en associant un intervalle de temps de parole (slot time) à chaque nœud capteur dans un cluster donné, et d'autre part, pour atténuer les effets de la réception indésirable car dans cette situation chaque nœud capteur sait à quel moment il doit transmettre.

Toutefois, ces derniers nécessitent la présence d'une autorité de gestion (par exemple un point d'accès dédié) pour orchestrer les différentes activités à l'intérieur d'un cluster. Dans ces protocoles, le canal est divisé en intervalles de temps élémentaires. Ces intervalles sont regroupés en trames logiques ou Frame Figure 2.3, dans laquelle un ensemble de N intervalles contigus forme une trame logique.

Dans chaque trame logique, un nombre spécifique d'intervalles sont assignés à chaque nœud capteur durant lesquels il peut opérer. La planification de ces intervalles peut être fixe, construite à la demande par la station de base ou hybride.

En dehors des intervalles attribués, un nœud capteur peut passer en mode veille pour économiser l'énergie. Cependant, dans un RCSF nous aurons besoin plutôt de protocoles distribués pour allouer les intervalles de temps aux nœuds capteurs. Mais, ces schémas distribués sont complexes à opérer dans un RCSF.

Le changement de topologie du réseau, due par exemple à l'épuisement d'énergie d'un nœud capteur, au déploiement de nouveaux nœuds capteurs ou à une éventuelle mobilité d'un nœud capteur, nécessite une exécution périodique des protocoles d'allocation d'intervalles de temps.

En plus, les schémas MAC basés sur l'approche TDMA nécessite une synchronisation entre les nœuds capteurs afin d'éviter des chevauchements des intervalles. Ceci nécessite évidemment une exécution en continu d'un protocole de synchronisation. Ceci rend par conséquent l'utilisation de ces protocoles plus complexe dans les RCSF où les nœuds capteurs en général ont la même priorité et disposent de ressources très limitées.

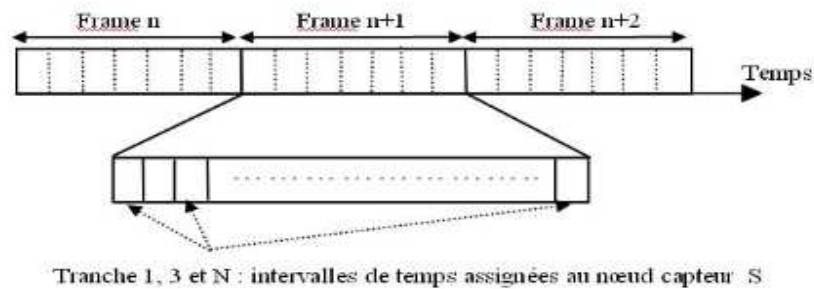


FIGURE 2.3 : TRAME LOGIQUE DANS UN PROTOCOLE MAC A BASE DE TDMA

Approches à base de contention : Ces protocoles dits de compétition de type CSMA (Carrier Sense Multiple Access) sont très utilisés dans les réseaux sans-fil multi-sauts du fait de leur simplicité et de leur adéquation à bien fonctionner dans un environnement décentralisé comme celui des réseaux de capteurs. Lorsqu'un protocole

est utilisé, il peut y avoir collisions si un récepteur est localisé dans la portée radio d'au moins deux émetteurs transmettant simultanément.

Cela fait que ce dernier ne réussira pas à recevoir aucun paquet. Ces collisions provoquent des retransmissions à la fois au niveau de l'émetteur et du récepteur. Les collisions sont souvent le résultat du problème du terminal caché. Considérons la situation illustrée à la Figure 2.4 où A et B peuvent communiquer entre eux, mais A et C ne le peuvent pas. Chacun des nœuds capteurs A et C désire transmettre un paquet de données (DATA) à leur récepteur commun, soit B. Les deux nœuds capteurs émetteurs, après avoir détecté que le canal est libre, commencent la transmission de leurs paquets. Les signaux transmis par A et C se croisent au niveau du récepteur B et seront donc détruits. On dit alors qu'il s'agit d'une collision à niveau de B.

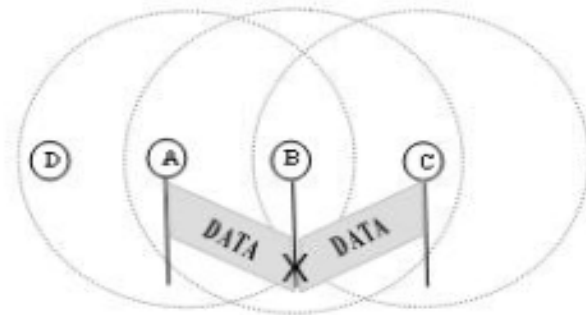


FIGURE 2.4 : SCENARIO DU TERMINAL CACHE

Pour réduire ces collisions dans les réseaux de capteurs, le standard 802.11 introduit un mécanisme dit porteuse virtuelle basée sur le schéma RTS (Request-To-Send) / CTS (Clear-To-Send) défini par le protocole MACA (Multi Access Collision Avoidance). En utilisant ce schéma, les collisions entre les nœuds capteurs cachés peuvent être évitées.

En effet, un nœud capteur (A Figure 2.5) désireux transmettre un paquet unicast initie la transmission par l'envoi d'un paquet de contrôle RTS après un temps bien spécifié appelé DIFS (Distributed Inter Frame Space). Le récepteur (le nœud capteur B Figure 2.5) attend un temps appelé SIFS (Short Inter Frame Space) avant de répondre par un paquet de contrôle CTS.

Ce dernier sert à informer les voisins de B d'un transfert imminent. Puisque l'intervalle de temps SIFS est inférieur à celui de DIFS, le récepteur aura l'avantage d'avoir le canal pour pouvoir transmettre un paquet [86] avant tout autre nœud capteur.

Le transfert de données effectif entre A et B aura lieu sans collision. Ainsi, après une période SIFS, le paquet de données est transmis par A et le récepteur B attend d'abord une période SIFS avant d'acquiescer la bonne réception de ce paquet en transmettant un paquet de contrôle ACK (ACKnowledgement).

Une procédure, appelée *binary exponential backoff*, est utilisée lorsque deux paquets RTS entre en collision qui est techniquement possible. Les paquets RTS/CTS spécifient dans leurs entêtes la durée que doit prendre une séquence de communication DATA/ACK. Cette durée permet aux nœuds capteurs du voisinage, qui écoutent en permanence la porteuse, de mettre à jour leurs NAV (Network Allocation Vector).

Ceci permet d'éviter de transmettre jusqu'à expiration de cette durée qui est donnée par NAV(RTS) au niveau de chaque voisin de A et NAV(CTS) au niveau de chaque voisin de C Figure 2.5.

Il est à noter que le module radio peut être mis en mode veille pendant la durée NAV pour préserver l'énergie due à l'écoute indésirable. Tous les paquets multi destinataires (Multicast) ou de diffusion (Broadcast) sont transmis sans l'utilisation du schéma RTS/CTS. Selon K. Sohraby et alliés [81], le schéma RTS/CTS est suffisant pour réduire considérablement les collisions et améliorer l'utilisation de la bande passante, lorsqu'il est appliqué aux protocoles à base de contention. Mais malheureusement il ne permet pas de résoudre complètement le problème du terminal caché.

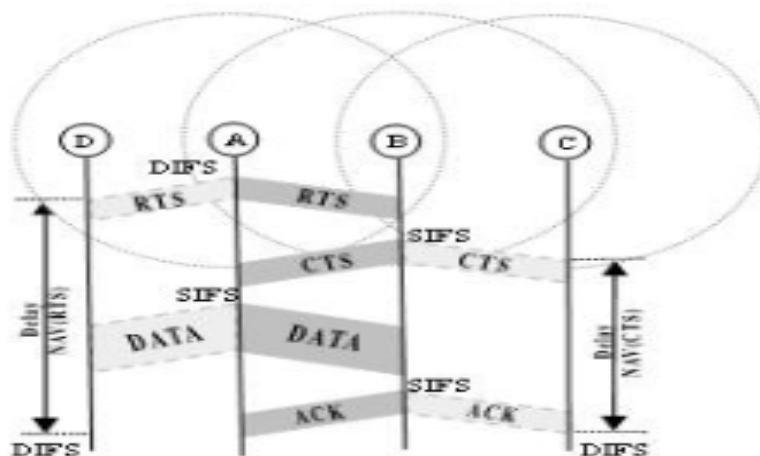


FIGURE 2.5 : SCHEMA RTS/CTS POUR EVITER LES COLLISIONS

Plusieurs protocoles MAC ont été développés dans le but de réduire considérablement d'autres sources de gaspillage d'énergie. Ils mettent l'accent essentiellement sur l'écoute de la porteuse à vide, mais les collisions, les paquets de contrôle et l'écoute indésirable sont aussi évoqués. La première approche, qui vise à réduire l'écoute de la porteuse, est basée sur le contrôle du préambule.

Elle opère au niveau physique et elle est utilisée dans plusieurs travaux. Dans cette approche asynchrone Figure 2.6, un récepteur met en mode actif périodiquement son module radio pour examiner les données qui y arrivent afin de détecter la présence ou non du préambule.

Si ce dernier est détecté, le module radio continue à écouter la porteuse jusqu'à ce que le symbole début (start-symbol) arrive et le message peut ainsi être proprement reçu. Si le préambule n'est pas détecté, le module radio sera désactivé de nouveau jusqu'au prochain contrôle.

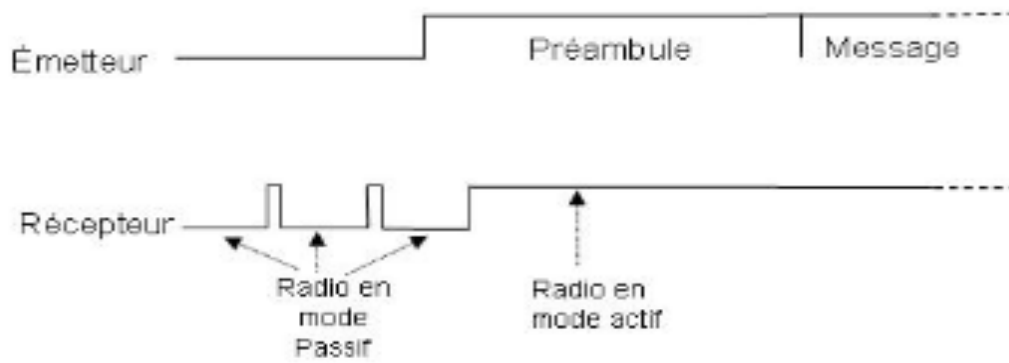


FIGURE 2.6 : PREAMBULE EMETTEUR/ RECEPTEUR MODULE RADIO

La seconde approche, visant à atténuer l'effet de l'écoute de la porteuse, utilise les mécanismes Veille/réveil et/ou un mécanisme de signalisation RTS/CTS/DATA/ACK inspiré du standard 802.11x afin de réduire les collisions, l'écoute indésirable et les paquets de contrôle.

Parmi les protocoles les plus connus dans la littérature et qui utilisent cette approche nous pouvons citer S-MAC, T-MAC, D-MAC. T-MAC et D-MAC qui sont similaires à S-MAC mais avec un cycle d'activité adaptatif (adaptive duty cycle).

S-MAC (Sensor-MAC) est un protocole très populaire développé à l'université de Californie. Son principal objectif est de conserver le plus possible d'énergie dans un RCSF, contrairement à d'autres problèmes comme par exemple l'équité et la latence qui sont considérés moins critiques.

L'idée de base autour de ce protocole consiste à gérer localement les synchronisations et planifier les périodes Veille/Réveil en se basant sur ces synchronisations. Les nœuds capteurs du voisinage forment des clusters virtuels dans lesquels ils diffusent périodiquement des messages de synchronisation de type SYNC pour se maintenir synchronisés.

Si deux nœuds capteurs voisins appartiennent à deux clusters virtuels, ils se réveillent durant les périodes réveil des deux clusters. D'après la Figure 2.7, chaque cycle (frame) dans S-MAC est divisé en deux périodes : période d'activité (active period) et période de veille (sleep period). La période d'activité est divisée en trois parties qui correspondent successivement aux paquets suivants SYNC, RTS et CTS.

La Figure 2.7 montre bien que les nœuds capteurs 1, 2 et 3 partagent un même cluster virtuel. Le nœud capteur 3 initie un échange de RTS/CTS avec le nœud capteur 1 pour lui transmettre les données. Lorsque le message CTS est reçu par le nœud capteur 3, la transmission de données suit immédiatement. Les nœuds capteurs 1 et 3 restent actifs jusqu'à la fin du transfert des données, alors que le nœud capteur 2 planifie normalement sa période de veille.

Dans la période veille, les nœuds capteurs communicants entrent en mode veille (économie d'énergie) en désactivant leurs modules radio juste après que la transmission se termine. Les collisions peuvent être évitées suite à des écoutes de la porteuses (carrier sense ou CS Figure 2.7). Dans S-MAC, un long message est divisé en trames, mais leur transmission nécessite seulement un RTS et un CTS.

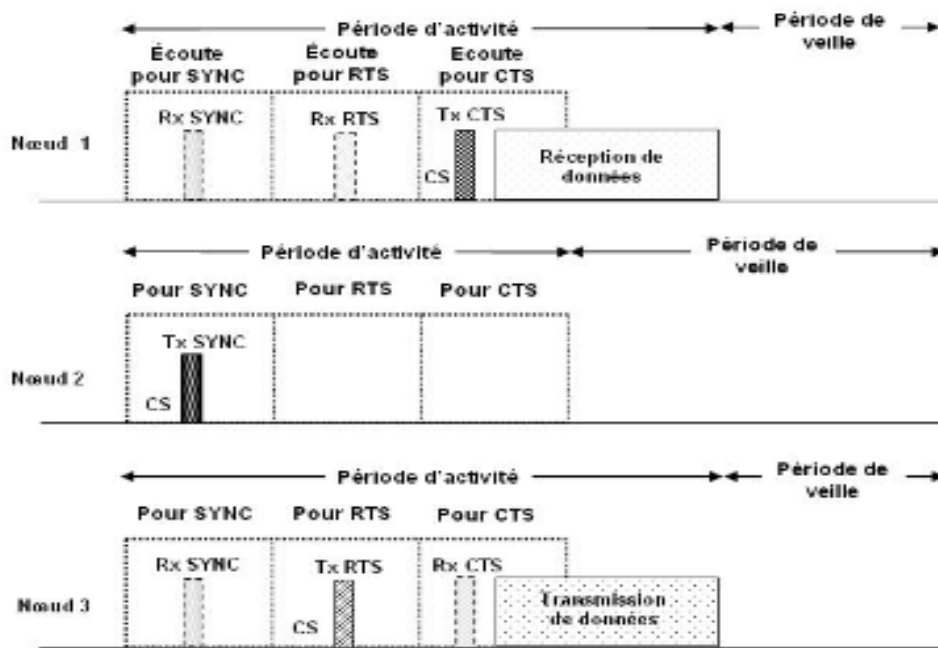


FIGURE 2.7 : RELATION TEMPORELLE ENTRE DIFFERENTS NŒUDS CAPTEURS DANS S-MAC

T-MAC (Timeout-MAC) est un protocole qui permet d'adapter le cycle d'activité au trafic du réseau dans la perspective d'améliorer S-MAC. Mais, au lieu d'utiliser une période d'activité de longueur fixe, T-MAC emploie un mécanisme de 'time-out' (TA) pour déterminer dynamiquement la fin de la période d'activité.

A la Figure 2.8, lorsqu'un nœud capteur ne détecte aucune activité durant la période de 'time out', il aura comme connaissance qu'aucun nœud capteur voisin ne désire communiquer avec lui et il entre ainsi dans une période de veille. Si dans le cas contraire le nœud capteur s'engage ou est en écoute d'une communication en cours, il pourra initier une période de 'time out' une fois que cette communication se termine.

D-MAC (Data-gathering MAC) est un protocole qui emploie un cycle d'activité comparable à celui de T-MAC pour économiser de l'énergie. Il est facile à utiliser et offre une faible latence de bout en bout (i.e. d'un nœud source jusqu'à la destination) grâce au paradigme de communication 'convergecast' qu'il supporte.

Bien que ce protocole enregistre une meilleure latence comparativement aux autres méthodes basées sur le mécanisme Veille/Réveil, le problème de collision n'est pas pris en charge.

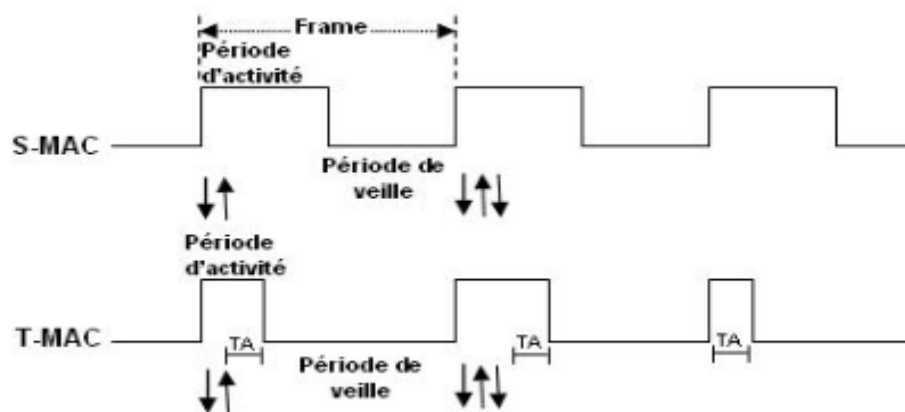


FIGURE 2.8 : CYCLES D'ACTIVITE DE S-MAC ET T-MAC

Approches hybrides Z-MAC (Zebra MAC) est un protocole MAC hybride pour les RSCSF. Il combine les points forts de TDMA et CDMA tout en essayant d'éviter leurs faiblesses.

La principale caractéristique de ce protocole est son adaptabilité au niveau de contention dans le réseau de telle sorte qu'en cas de faible contention, il se comporte comme CSMA et en présence de forte contention il se comporte comme TDMA. Ce

qui le distingue par rapport à d'autres protocoles MAC est la robustesse de sa performance dans les cas suivants: erreurs de synchronisation, erreurs d'assignation de slot et les variations de l'état du canal dans le temps. Z-MAC est utilisé par le nœud capteur Mica2 en tant que protocole de niveau MAC.

Approches inter-couches

L'optimisation et la conception inter-couches est une nouvelle technique pour concevoir et améliorer la performance des RCSF. En particulier, une nouvelle génération de protocoles MAC appelée protocoles MAC Inter-couches (Cross-layer MAC protocols), utilisant plusieurs couches à la fois, a émergée.

Ces couches, montrées à la Figure 2.9, peuvent être exploitées en deux modes: interaction ou unification.

Dans le mode interaction, le protocole MAC est construit en exploitant les données d'autres couches adjacentes. Le protocole MAC-CROSS, proposé par C. Suh et alliés. [84], est un exemple implémentant l'approche inter-couches en permettant à la couche MAC d'exploiter les informations de routage de la couche réseau (interaction entre les couche MAC et réseau). En laissant, seulement les nœuds capteurs communicants en activité et en mettant en mode veille, tous les autres nœuds capteurs voisins non concernés par la communication en cours. MAC-CROSS utilise les messages de contrôle RTS/CTS/ACK pour éviter les collisions.

Par contre, en mode de conception inter-couches par unification, l'élaboration d'une seule couche regroupant à la fois les fonctionnalités des couches.

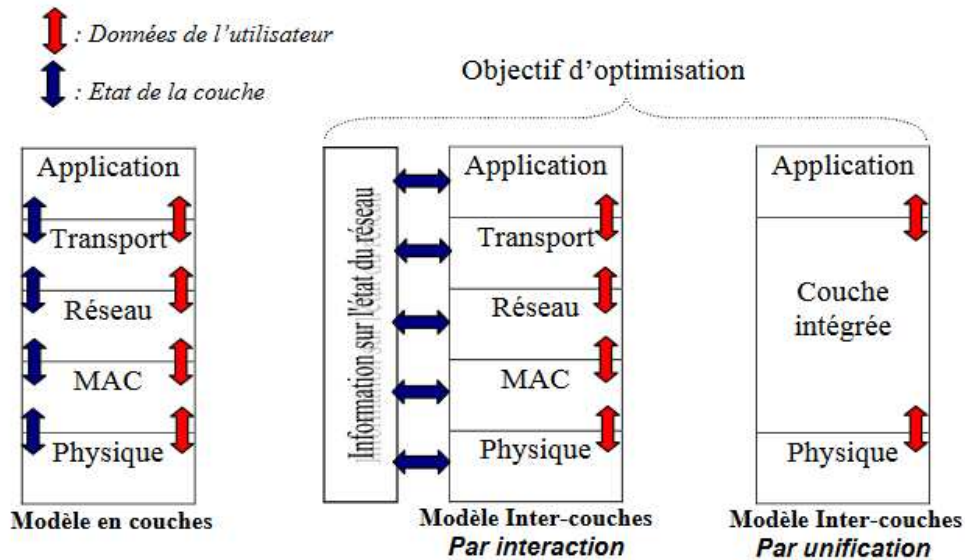


FIGURE 2.9 : ILLUSTRATION D'UN MODELE EN COUCHES

Approches dirigées par les données

L'approche dirigée par les données comprend deux grandes parties Figure 2.10 qui sont :

*Réduction des données

Cette première partie s'occupe du traitement dans le réseau, de la prédiction des données, de la compression des données et du codage des données.

*Acquisition des données à économie d'énergie

Cette seconde partie gère le prélèvement adaptatif, le prélèvement hiérarchique et le prélèvement actif dirigé par modèle.

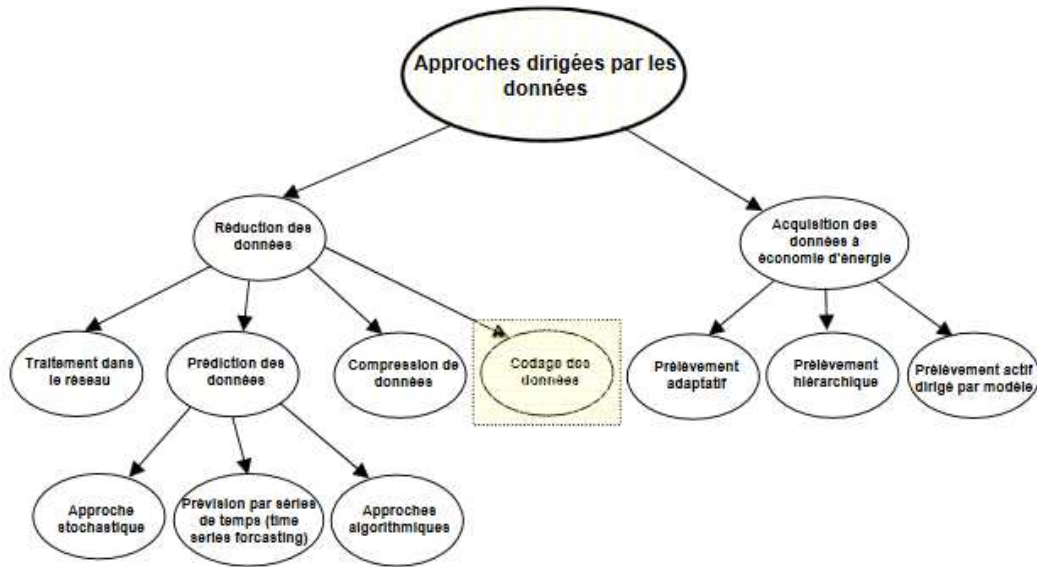


FIGURE 2.10 : CLASSIFICATION DES APPROCHES DIRIGÉES PAR LES DONNÉES

Approches basée sur la mobilité

L'approche basée sur la mobilité concerne essentiellement deux entités qui sont représentées à la figure 2.11 : Le Sink mobile et le nœud capteur mobile. Le Sink mobile est chargé de collecter les données des nœuds capteurs fixes ou mobiles à travers ses déplacements. Quant au nœud capteur mobile, en général, il suit un phénomène mobile qui peut être un volcan en éruption ou un animal dans la nature qu'on veut suivre de près.

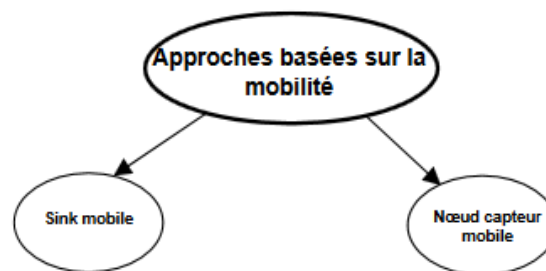


FIGURE 2.11 : CLASSIFICATION DES APPROCHES BASEES SUR LA MOBILITE

II.5.2 Discussion

La classification présentée dans ce chapitre relative aux approches à minimisation d'énergie pour les RCSF est à notre avis plus adéquate et plus réaliste, comparativement à d'autres classifications qu'on peut trouver dans la littérature. Elle est reproduite en grande partie de celle proposée par *G. Anastasi et alliés* avec une amélioration sensible par l'adjonction des classes suivantes (encadrées en pointillé dans les Figures 2.9 et 2.10) :

- ❖ La classe des approches de configuration de la topologie qui regroupe les techniques de clustering et les techniques de contrôle de la puissance de transmission radio sont importantes pour de l'énergie dans un RCSF.
- ❖ L'approche de codage réseau (network coding), est considérée comme une forme de réduction des données. Elle fait partie de la classe des approches dirigées par les données. Pour l'heure, elle est l'une des méthodes les plus adaptées pour diminuer le trafic réseau dans un RCSF.

Une combinaison de différentes approches proposées dans cette classification avec pour perspective une démarche visant l'économie d'énergie nous semble une solution intéressante.

Nous pouvons attribuer la première contribution à la classe des approches de contrôle de topologie. La deuxième contribution peut être classée parmi les protocoles MAC avec faible cycle d'activité mais en prenant en considération le paradigme inter-couche. La troisième contribution fait intervenir à la fois la classe des approches basées sur la mobilité et la classe relative au contrôle de la topologie. La quatrième contribution comme son nom l'indique fait partie de la classe des approches de compression de données.

Les solutions basées sur la minimisation d'énergie dans les RCSF sont des solutions que nous qualifions de 'Best effort' car elles peuvent répondre aux exigences de certaines applications des RCSF mais elles s'avèrent inefficaces pour d'autres.

Ainsi, des solutions couplées avec les technologies récentes basées sur l'extraction de l'énergie ambiante de l'environnement dans lequel le réseau est déployé méritent une

attention particulière et ouvrent de nouvelles perspectives de recherches plus prometteuses.

Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté un état de l'art sur les techniques de conservation d'énergie dans les RCSF. Ces techniques ont été présentées sous forme d'une classification. Celle-ci a été décrite en suivant une approche descendante, des classes générales aux classes de base par affinement successif. Les approches ayant un lien direct avec nos contributions n'ont pas été exposées.

L'étude des différentes approches de routage hiérarchique nous a permis de comprendre les techniques de Clustering ainsi que de mettre en relief les avantages et les inconvénients des approches adoptées pour cette techniques de routage.

Cela nous a inspiré et permis de mettre en œuvre une proposition de routage hiérarchique à basse consommation énergétique que nous allons présenter dans les chapitres suivants conformément à nos contributions.

**CHAPITRE III : MINIMISATION DES DEPENSES
ENERGETIQUES AU SEIN DES RESEAUX DE CAPTEURS
SANS-FIL**

Introduction

Un réseau de capteurs sans-fil est un ensemble de nœuds capteurs déployés dans une zone capture pour mesurer des grandeurs physiques telles que la température, la pression, la vibration, etc. L'information captée est ensuite transmise vers la station de base, laquelle l'achemine à l'utilisateur final via un autre réseau de communication. Un tel réseau est utilisé dans plusieurs applications médicales, environnementales et militaires par exemple.

Selon l'application, les nœuds capteurs peuvent être déployés d'une manière déterministe ou aléatoire. Le déploiement déterministe consiste à placer les nœuds capteurs dans des endroits bien déterminés, tandis que l'aléatoire consiste à disperser les nœuds capteurs dans une zone de capture sans que la position soit prédéfinie. Dans un réseau de capteur sans-fil, les nœuds capteurs sont alimentés par des sources d'énergie relativement faibles, généralement irremplaçables. Ils sont déployés dans des zones difficilement accessibles. Ceci rend l'énergie une ressource critique à conserver au maximum possible pour prolonger la durée de vie du réseau de capteurs sans-fil.

A cet égard, plusieurs travaux de recherche se focalisant sur le problème de l'énergie ont été proposés dans la littérature. Ces travaux peuvent être des protocoles MAC avec contention, des protocoles MAC basés sur TDMA ou des protocoles hybrides. La majorité de ces protocoles essaient de minimiser la consommation d'énergie causée par l'écoute d'un canal libre, la surémission, la retransmission, l'écoute active, la surcharge.

Bien que multiples, ces protocoles ne sont pas suffisamment efficaces et robustes, ce qui nous a motivé de travailler sur la problématique de l'énergie afin de proposer une solution qui minimise la consommation d'énergie et prolonge la durée de vie du réseau en conséquence.

Notre point de départ était l'étude analytique et critique des solutions existantes, maintenant, nous proposons une solution qui se base sur le principe des nœuds capteurs actifs/passifs et l'agrégation des données. L'idée principale, c'est de regrouper les nœuds capteurs en cluster. Chaque cluster contient un nombre restreints de nœuds

capteurs initialement actifs. Parmi ces nœuds capteurs actifs, un nœud capteur agrégateur est choisi. Ce dernier est responsable d'agréger les données envoyées par les autres nœuds capteurs actifs et d'envoyer le résultat d'agrégation à la station de base.

Bien évidemment, un processus de remplacement des nœuds capteurs actifs par des nœuds capteurs passifs est déclenché dès que l'énergie d'un nœud capteur actif s'épuise. Dans notre solution l'énergie est conservée à deux niveaux.

Premièrement, les données captées sont agrégées, ce qui minimise le nombre de messages transmis et préserve l'énergie des nœuds capteurs en conséquence.

Le deuxième aspect, est le nombre restreint de nœuds capteurs (nœuds actifs) qui participent dans les opérations du réseau, ce qui prolonge davantage la durée de vie du réseau.

III.1 Contexte et justification

L'élément important dans le réseau de nœuds capteurs sans-Fil (RCSF), c'est l'énergie.

Selon la méthode que nous allons expliquer, un groupe de nœuds capteurs appelé Cluster est déployé dans une zone géographique appelée zone de captage ou zone d'intérêt, afin de surveiller un phénomène quelconque et de récolter des données d'une manière autonome.

Le réseau capteurs sans-fil est utilisé pour diverses applications à cause de sa fiabilité, de son exactitude, de sa flexibilité, de son efficacité, de son faible coût et de son déploiement aisé [Ravi T, 2014].

Plusieurs approches ont déjà été conduites par les chercheurs vers le développement de schémas de routages d'énergie efficace. A savoir les routages plats, hiérarchiques, à base de localisation, etc. Parmi ces approches, le routage hiérarchique paraît le plus attractif. Beaucoup d'algorithmes ont été développés sur la base du protocole hiérarchique [Ravi T, 2014].

Fondamentalement, chaque nœud capteur comprend la captation, le traitement, la transmission, le mobilisateur, le système de repérage de position et les unités de puissance (certains de ces composants sont optionnels tels que le mobilisateur).

Des schémas à base de clustering pour l'efficacité énergétique afin de prolonger la durée de vie du réseau, sont discutés selon plusieurs chercheurs.

Exemple :

Le protocole LEACH [W. R. Heinzelman et alliés, 2000] introduit par **Heinzelman et Alliés.** est l'un des premiers protocoles de routage à base de clustering. La plupart des schémas de clustering proposés dans la littérature visent le même objectif, l'efficacité énergétique au sein du réseau de capteurs sans-fil.

Le protocole LEACH détermine une fraction P de tous les nœuds capteurs qui peuvent devenir des Clusters Head à priori.

Il ne fournit pas d'assurance concernant le nombre des nœuds capteurs clusters Head ou la subdivision des Clusters [Ravi T, 2014]. Pour l'extension des réseaux de capteurs sans-fil, l'efficacité énergétique joue un rôle essentiel.

Plusieurs protocoles se basent sur le système de routage hiérarchique afin d'obtenir une route optimale pour la transmission de données.

La route optimale est sélectionnée sur la base des métriques telles que saut unique, l'énergie résiduelle, émission minimum, etc. pour router les données [Ochirkhand E. et alliés, 2010], [Long Cheng et al, 2010].

Dans les réseaux de capteurs sans-fil, le routage est la clé d'une efficacité énergétique et d'une prolongation la durée de vie [Rajevv A. et alliés, 2015].

Les nœuds capteurs sont répartis en Cluster, et les nœuds capteurs ayant une grande réserve d'énergie sont sélectionnés comme des Clusters Head (CH). Dans chaque Cluster, le Cluster Head sélectionnée reçoit et agrège les données de tous les autres nœuds capteurs du Cluster.

Les données ont la même capacité au niveau de tous les nœuds capteurs, y compris celles du Cluster Head. Si chaque nœud capteur d'un cluster envoie un message de 100 bits au cluster Head, alors le Cluster Head envoie le message agrégé de 100 bits à la station de base [Zahoor A, et alliés, 2012], [W. R. Heinzelman et al, 2000], [Thanh T et alliés, 2012], [T. Nguyen, 2012].

En faisant agréger les données par le Cluster Head, qui à son tour les transmet à la station de base, cela permet de minimiser les dépenses d'énergie et d'éviter que tous les nœuds capteurs envoient leurs données directement à la station de base.

Compte tenu de l'hétérogénéité en termes d'énergie, la durée de vie du réseau de capteurs sans-fil peut être prolongée. Un algorithme est fonctionnel lorsque la zone d'intérêt est couverte par les nœuds capteurs actifs. La période dans laquelle le réseau est fonctionnel est appelée période persistante [Mehra P et alliés, 2015].

Quant aux utilisateurs finaux, ils reçoivent les données du nœud capteur par l'intermédiaire de la station de base et réalisent le traitement sur les données reçues [Salim El et alliés, 2014].

Il existe plusieurs étapes dans le déploiement du réseau de capteurs sans-fil telle que l'extension, la programmation, la maintenance, la qualité de service, le type de service et la durée de vie du réseau [Manisha et alliés, 2016].

La méthode que nous proposons se distingue par sa manière d'accroître les données envoyées à la station de base, tout en améliorant la durée de vie du réseau de capteurs sans-fil.

En d'autres termes, cette approche contribue à améliorer deux critères : augmenter la capacité du réseau et prolonger la durée de vie du réseau de capteurs sans-fil.

A travers les simulations, nous avons évalué la performance de notre solution en termes de minimisation de la consommation d'énergie et de la prolongation de la durée de vie du réseau de capteurs sans-fil. Les résultats montrent que la solution proposée est efficace et rallonge considérablement la durée de vie du réseau.

III.2 Modèle du réseau de capteurs sans-fil

Le réseau considéré est composé d'un certain nombre de nœuds capteurs déployés aléatoirement dans une zone de capture, avec une station de base qui recevra des données capturées pour les acheminer ensuite à l'utilisateur final (figure 3.1). Les nœuds capteurs sont organisés sous forme de cluster et chaque cluster est géré par un Cluster Head.

Initialement, un nombre restreint de nœuds capteurs est actif dans un cluster donné et les autres sont passifs. Aussi, parmi les nœuds capteurs, on désigne un nœud agrégateur qui reçoit les données des autres nœuds capteurs, les agrègent pour les envoyer ensuite à la station de base.

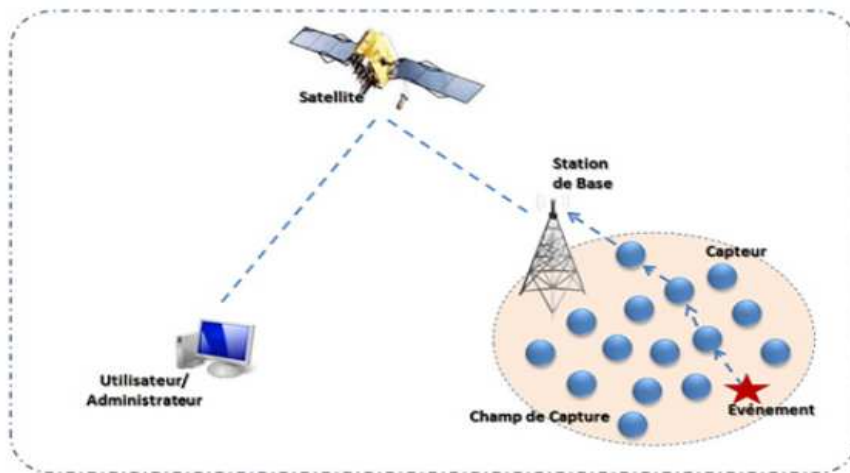


FIGURE 3.1 – MODELE DU RESEAU

III.3 Solution proposée

Notre but est la conservation et la minimisation de dépense énergétique des nœuds capteurs, afin de prolonger la durée de vie du réseau de capteurs sans-fil. Pour cela, nous proposons une amélioration du protocole de RAVI TOMAR qui s'est inspiré du protocole EEPSC (Energy Efficient Protocol with Static Clustering). Notons qu'EEPSC est une version améliorée du protocole LEACH.

Dans un premier temps, nous allons présenter les hypothèses selon lesquelles notre solution est fonctionnelle ensuite, nous détaillons notre proposition.

III.3.1 Hypothèses

Nous supposons que l'architecture de notre réseau est hiérarchique, i.e., les nœuds capteurs sont organisés sous forme de cluster, et chaque cluster a un Cluster Head, qui communique les données reçues à la station de base. Nous considérons que les nœuds capteurs sont hétérogènes, i.e., ils ont initialement les mêmes capacités énergétiques, de calcul et de stockage.

III.3.2 Détail de la solution proposée

Notre solution se base sur le même principe de la sélection des Clusters Head du protocole EEPSC et celui du protocole RAVI TOMAR.

Le protocole LEACH sélectionne le Cluster Head à l'aide de son algorithme, qui indique le nœud capteur dont la valeur énergétique résiduelle est la plus élevée que les autres. Avec cette méthode, les nœuds capteurs meurent vite les uns après les autres. Car une fois que l'énergie du Cluster Head est épuisée, l'algorithme sélectionne un nouveau Cluster Head (celui-ci est connu dès le lancement du programme n et $n+1$ d'avance).

Le protocole EEPSC fait du Clustering avant de sélectionner le Cluster Head de chaque Cluster. En procédant ainsi, chaque Cluster passe par un Cluster Head pour envoyer les données à la station de base. Cela rallonge un peu la durée de vie du réseau que le protocole LEACH.

Le protocole de RAVI TOMAR s'inspire de méthode d'EEPSC. En plus du Clustering et de l'énergie résiduelle élevée du nœud capteur, la désignation du Cluster Head doit obéir à une distance centralisée.

C'est-à-dire, pour être Cluster Head, le nœud capteur doit être le plus possible au centre du Cluster par rapport aux autres nœuds capteurs. A cet effet, un calcul de distance entre les différents nœuds capteurs est fait pour savoir lequel est mieux centré. C'est une bonne approche en termes de réduction de la distance et de minimisation d'énergie. Sa méthode rallonge un peu plus la durée de vie du réseau de capteurs qu'EEPSC.

Notre méthode part du même principe que celui de RAVI TOMAR avec un rajout d'une nouvelle fonctionnalité.

Il s'agit dans notre cas, de léguer certaines fonctions du Cluster Head au Vice-Cluster Head. En plus clair, en plus du processus de désignation du Cluster Head, nous désignons également des Vices-Clusters Head à sa suite pour l'aider dans sa tâche de Cluster Head. Si un événement se produit dans une zone donnée, le Vice-Cluster Head le plus proche de l'événement s'en occupe comme étant le Cluster Head.

Cela empêche l'épuisement rapide de l'énergie du Cluster Head et permet aux nœuds capteurs de travailler ensemble le plus longtemps possible. Ce qui a pour suite une augmentation de la capacité du réseau de capteurs sans-fil et une bonne rallonge de la durée de vie de ce même réseau figure 3.2.

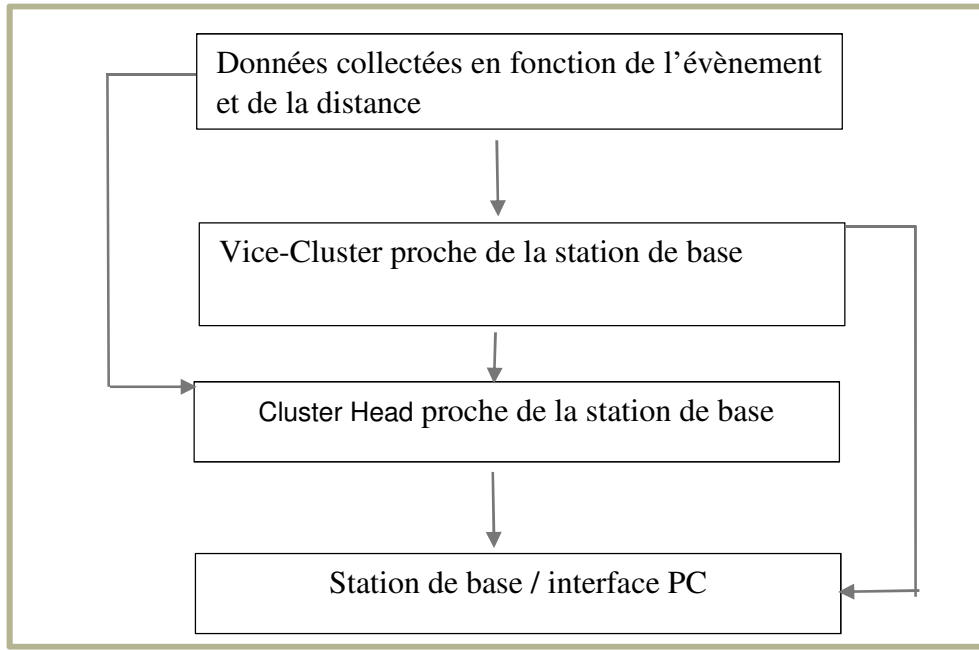


FIGURE 3.2 : PROCESSUS DE TRANSMISSION DES DONNEES

III.4 Algorithmme

Pour ce faire, nous utilisons les mêmes paramétrages et prouvons que nous avons apporté une bonne amélioration de la durée de vie du réseau de capteurs sans-fil.

Soit :

n = Nombre total des nœuds capteurs

q = Nombre de subdivision de Ω

r = Nombre de tours

On considère ensuite une subdivision de domaine Ω en différentes zones Ω_i , avec

$i \in \{1, 2, \dots, q\}$, distinctes deux à deux. On définit alors la partition de Ω de la manière suivante :

$$P_{\Omega} = \{\Omega_i, i \in \{1 ; 2 ; \dots ; q\} : \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \dots \cup \Omega_q = \Omega \text{ et } \Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset\}$$

On définit également la partition des nœuds

$$P_A = \{A_i, i \in \{1 ; 2 ; \dots ; q\} : A_1 \cup A_2 \dots \cup A_q = A \text{ avec } A_i \subset \Omega_i \text{ et } A_i \cap A_j = \emptyset \text{ si } i \neq j\}$$

III.4.1 Sélection du Cluster Head

Soient $n, q, r \in \mathbb{N}^*$ et

$A = \left\{ 1 ; 2 ; \dots ; n \right\}$ l'ensemble des nœuds de la zone d'étude Ω que nous supposons rectangulaire de longueur X_m et de largeur Y_m .

On désigne par A_i l'ensemble des nœuds de la zone Ω_i .

Nous posons, également

$P_A = \{A_i, i \in \{1 ; 2 ; \dots ; q\} : A_1 \cup A_2 \dots \cup A_q = A \text{ avec } A_i \subset \Omega_i \text{ et } A_i \cap A_j = \emptyset \text{ si } i \neq j\}$ une partition de A .

Notons CH_i Cluster Head de la zone Ω_i .

Chaque nœud capteur k de Ω génère, de façon aléatoire, un nombre $m(k)$ compris entre 0 et 1.

Le seuil d'éligibilité du nœud capteur CH_i de la zone Ω_i est défini par la formule 3.1 suivante :

$$T(k) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * r \bmod \left(\frac{1}{P}\right)} & \text{si } k \in A_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

Où P est le pourcentage des Clusters Head et r est le nombre de tours.

Si $m(k) \geq T(k)$ alors le nœud capteur k est éligible. La sélection des Clusters Head est faite aussi selon la distance euclidienne qui les sépare.

Définition

Soient $F(X_F, Y_F)$ et $G(X_G, Y_G)$ dans un repère orthonormé $R = (o, \vec{i}, \vec{j})$

On appelle la distance entre les points F et G du repère R le nombre réel positif noté $d(F, G)$ calculé dans l'équation 3.2 suivante :

$$d(F, G) = \sqrt{(X_G - X_F)^2 + (Y_G - Y_F)^2} \quad (3.2)$$

Les Clusters Head sont sélectionnés parmi ceux qui vérifient le critère d'éligibilité et l'inégalité de l'équation 3.3 suivante :

$$\forall i \neq j, d(CH_i; CH_j) \geq \sqrt{\frac{X_m Y_m}{K_{opt}}} = MSD ; \quad (3.3)$$

$$K_{opt} = \frac{1}{0,765} * \sqrt{\frac{n}{2\pi}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{fx}}{\varepsilon_{mp}}}$$

(MSD = Distance minimum entre deux Clusters Head).

III.4.2 Sélection du Vice-Cluster Head

Le seuil d'éligibilité du Vice-Cluster Head de la zone Ω_i est défini par la formule 3.4 suivante :

$$T_i(k) = \begin{cases} \frac{P_i}{1 - P_i * r \bmod \left(\frac{1}{P_i}\right)} & \text{si } k \in A_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.4)$$

Où P_i est le pourcentage de sous-chefs de la zone Ω_i , r est le nombre de tours.

Si $m(k) \geq T_i(k)$ alors le nœud k de A_i est éligible pour être Vice-Cluster Head de la zone Ω_i .

Ainsi les Vices-Clusters Head seront choisis dans l'ensemble S_i défini par l'équation 3.5 suivante :

$$S_i = \left\{ l \in A_i \setminus \{CH_i\} : m(l) \geq T_i(l) \right\} \quad (3.5)$$

Si on note n_i le nombre total de nœuds capteurs Vice-Clusters Head souhaité, alors les n_i premiers nœuds capteurs dans le classement avec un bon niveau d'énergie résiduelle seront sélectionnés comme Vices-Clusters Head de la zone Ω_i .

III.5 Méthode de transmission des données

D'après (3.2), la distance euclidienne entre le chef de groupe et la station de base est définie par l'équation 3.6 suivante :

$$d(\text{CH}_i, \text{BS}) = \sqrt{(X_{\text{CH}_i} - X_{\text{BS}})^2 + (Y_{\text{CH}_i} - Y_{\text{BS}})^2} \quad (3.6)$$

Où $(X_{\text{CH}_i}, Y_{\text{CH}_i})$ et $(X_{\text{BS}}, Y_{\text{BS}})$ sont, respectivement, les couples de coordonnées du nœud capteur Cluster Head CH_i et de la station de base.

De même la distance euclidienne entre le $i^{\text{ème}}$ Vice-Cluster Head SCH_i et la station de base est définie par l'équation 3.7 suivante :

$$d(\text{SCH}_i, \text{BS}) = \sqrt{(X_{\text{SCH}_i} - X_{\text{BS}})^2 + (Y_{\text{SCH}_i} - Y_{\text{BS}})^2} \quad (3.7)$$

Où $(X_{\text{SCH}_i}, Y_{\text{SCH}_i})$ est le couple de coordonnées du $i^{\text{ème}}$ Vice-Cluster Head.

Soit Ω_{ie} la zone où l'évènement a lieu.

Si Ω_{ie} est loin de la station de base, nous choisissons la zone Ω_j voisine de Ω_{ie} qui contient le Cluster Head ou le Vice-Cluster Head le plus proche de la station de base.

De même, le Cluster Head ou le Vice-Cluster Head de Ω_j transmet l'information au Cluster Head ou Vice-Cluster Head qui est dans la zone Ω_k voisine de Ω_j et plus proche de la station de base. Ce processus se répète jusqu'à ce que l'information arrive à la zone Ω_p la plus proche. Le Cluster Head ou le Vice-Cluster Head de la zone Ω_p plus proche de la station de base envoie l'information à celle-ci.

Le processus de transmission d'information est utilisé à la figure 3.2.

Nous supposons que trois évènements se sont produits proches de la frontière supérieure la plus éloignée de la station de base.

A la Figure 3.3, nous proposons une méthode qui permet au Cluster Head d'avoir une longue durée de vie, évitant ainsi plus de mort des nœuds capteurs dans le réseau.

Avec cette méthode, nous obtenons un meilleur résultat par rapport au protocole LEACH, protocole EEPSC et le protocole de Ravi Tomar.

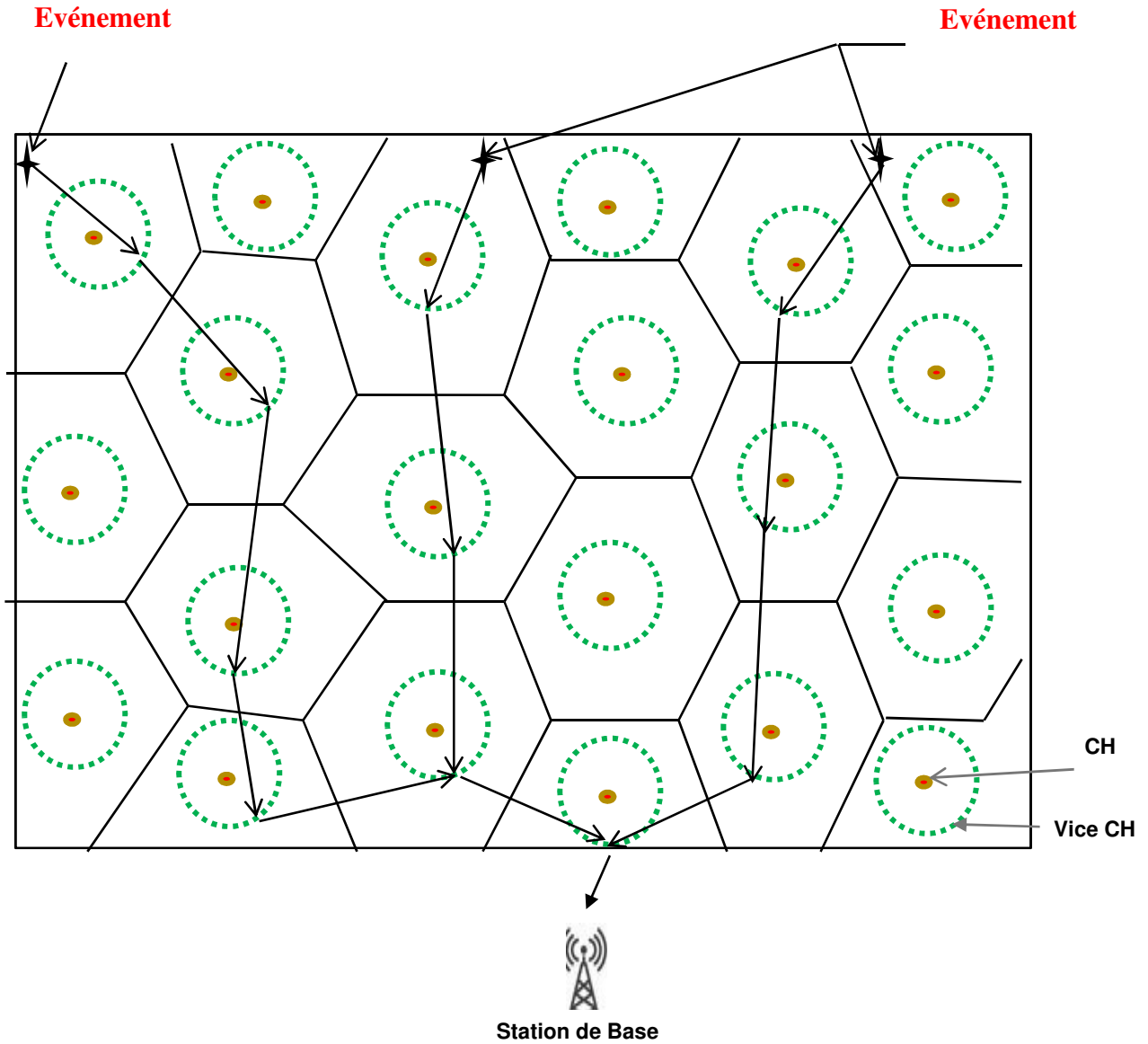


FIGURE 3.3: TRANSMISSION CLUSTER HEAD / VICE CLUSTER HEAD A LA STATION DE BASE

III.6 Evaluation des performances

Pour valider notre proposition, nous avons effectué une série de simulations avec le logiciel MATLAB 7.9.0 (R2009b). Dans ce qui suit, nous allons énumérer les paramètres de simulation et citer les différentes métriques mesurées, ensuite nous allons analyser et discuter les résultats de la simulation.

III.6.1 Paramètres de simulation

Afin de montrer l'efficacité de notre solution, nous avons considéré les paramètres suivants dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.1: Paramètres de simulation [Ravi T, 2014]

Paramètres	Simulation	Valeurs
M x N	Surface	100 meter x 100 meter
N	Nombre de nœuds	100
E_{elec}	Énergie électronique	50 nJ / bit
EDA	Énergie d'agrégation de données	5 nJ / bit / message
E_0	Energie Initiale	0.5 J
K	Taille du message	4000 bits
P_{opt}	Probabilité	0.05
ϵ_{fs}	Friss espace libre	10 pJ / bit / m ²
ϵ_{mp}	Friss multi-chemins	0.0013 pJ / bit / m ⁴
A	Niveau d'énergie pour les nœuds avancés	3
B	Niveau d'énergie pour les nœuds intermédiaires	1.5
m,x	% de nœuds devant être avancés et intermédiaires	0.2,0.3
BS	Emplacement de la station de base	(500,500)

III.6.2 Durée de vie du réseau

Pour pouvoir étudier la durée de vie du réseau en fonction du temps de simulation, nous avons suivi l'évolution de 100 nœuds capteurs dans le temps. La Figure 3.4 présente le nombre des nœuds morts dans le réseau en fonction du temps, afin d'examiner l'efficacité de notre protocole par rapport aux protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

Sur la figure, nous visualisons, pour chacun des trois protocoles, l'évolution du nombre de nœuds vivant sur une période allant du début de du déploiement jusqu'à 10 000 tours.

Nous constatons que pour le protocole LEACH et le protocole RAVI TOMAR, la durée de vie des capteurs ne dépasse pas 2 500 tours. En revanche, pour notre protocole DIETY, les nœuds capteurs restent en vie jusqu'à 9 500 tours.

Il est clair que la durée de vie du réseau de notre protocole surpasse celle du protocole LEACH et RAVI TOMAR, on remarque que notre protocole est beaucoup meilleur parce qu'il tient compte de l'hétérogénéité d'énergie et de son utilisation de sauts multiples en son sein.

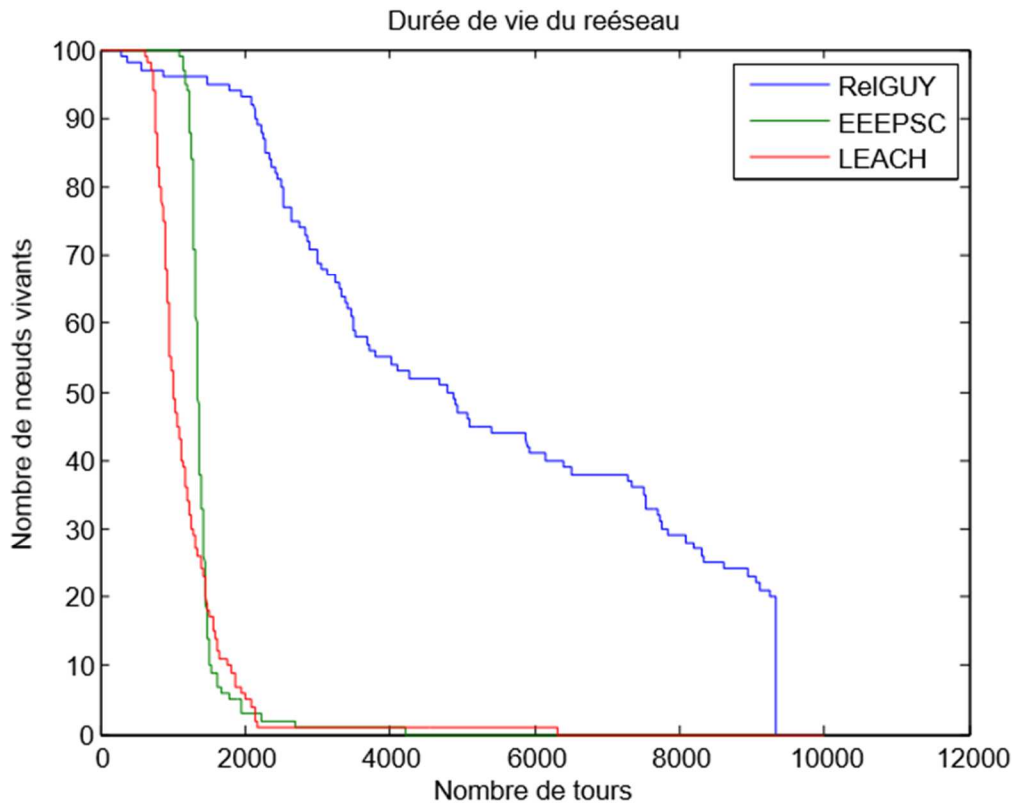


FIGURE 3.4: COMPARAISON DES NŒUDS VIVANTS PAR TOUR ENTRE DIETY, RAVI T., LEACH

Nous observons sur la figure 3.4 et en fonction des intervalles que :

❖ Entre 0 et 700 tours, le nombre de capteurs vivants diminuent, très faiblement, pour chacun des trois protocoles LEACH, RAVI TOMAR et DIETY.

Les trois protocoles restent, sensiblement, stables au cours des 700 premiers tours. Il est à préciser que le protocole LEACH est le premier à chuter et à perdre la moitié de ses capteurs avant 900 tours. Quant au protocole RAVI TOMAR, il perd la moitié de ses nœuds capteurs après environ 1 200 tours et le protocole DIETY, son nombre de capteurs vivants reste toujours supérieur à 90 entre 0 et 1 400 tours.

❖ Entre 1 400 tours et 2 500 tours, le nombre de nœuds capteurs est en dessous de 10 pour chacun des protocoles LEACH et RAVI TOMAR. Mais après 2 500 tours, le protocole LEACH et le protocole RAVI TOMAR perdent tous leurs nœuds capteurs. En ce qui concerne le protocole DIETY, le nombre de nœuds capteurs reste supérieur à 80 entre 1 400 et 2 500 tours.

Par contre, on observe une décroissance rapide (non brusque) à partir de 2 400 tours. Seul le protocole DIETY possède encore des nœuds capteurs après 2 500 tours. Il perd la moitié de ses nœuds capteurs au 5000^{ième} tour et perd la totalité de ses nœuds capteurs après 9 500 tours.

En dehors de l'intervalle de tours [0 ; 1300] où la courbe représentative du protocole DIETY est légèrement en dessous des courbes des protocoles LEACH et RAVI TOMAR. Pour le reste, le protocole DIETY est largement au-dessus des autres courbes.

La figure 3.4 montre l'évolution du nombre de nœuds vivants en fonction du nombre de tours [[1 : 10000]]. On peut noter de manière générale que le protocole DIETY perd très peu de nœuds par rapport aux autres protocoles RAVI TOMAR et LEACH. Nous observons précisément que :

- Entre 0 tour et 700 tours, le nombre de nœuds capteurs vivants diminue très faiblement pour chacun des protocoles.
- Entre 700 tours et 1400 tours, les protocoles LEACH et RAVI TOMAR subissent une chute brusque du nombre de nœuds vivants. Le protocole LEACH est le premier à chuter et à perdre la moitié de ses nœuds capteurs avant 900 tours. Quant au protocole RAVI TOMAR, il perd la moitié de nœuds capteurs après 1200 tours. Le protocole DIETY garde son nombre de nœuds capteurs constant supérieur 90 nœuds entre 0 et 1400 tours. Le protocole DIETY fournit un taux d'amélioration allant 20% à 98 % par rapport deux autres protocoles sur l'intervalle de tours [[900 : 1400]]
- Entre 1400 tours et 2500 tours, le nombre de nœuds capteurs est en dessous de 10 pour chacun des protocoles LEACH et RAVI TOMAR tandis que le protocole DIETY possède encore plus 80 nœuds capteurs vivants. Ce qui donne un taux d'amélioration variant entre 50% et 98% sur l'intervalle de tour [[1400 : 2500]].

- Après 2500 tours, les protocoles LEACH et RAVI TOMAR perdent tous leurs nœuds capteurs pendant le protocole DIETY en possède encore plus de la moitié de ses nœuds capteurs.
- Le protocole DIETY perd la moitié de ses nœuds capteurs à partir du 5000 i^{ème} tour et plus tard la totalité de ses nœuds capteurs à partir du 9500 i^{ème} tour.
- En dehors de l'intervalle $[[0 : 1300]]$ où la courbe représentative du protocole DIETY est légèrement en dessous des courbes de LEACH et RAVI TOMAR, pour le reste, le protocole DIETY est largement au-dessus des autres courbes.

En termes de durée de vie du réseau de nœuds capteurs, le protocole DIETY offre une meilleure optimisation. En effet il fournit 280% d'amélioration sur les deux autres protocoles.

III.6.3 Nombre de paquets transmis à la station de base

Dépendamment de la durée de vie du RCSF, avec notre méthode, nous pouvons transmettre plus de données à la station de base. La Figure 3.5 montre le nombre de paquets transmis à la station de base (BS) par tour.

Il se trouve que le protocole DIETY fournit des données en continue avec un taux de succès plus élevé, comparativement aux protocoles de Ravi Tomar et de LEACH pendant plusieurs nombres de tours. Les protocoles de LEACH et de Ravi T. ont réalisé une amélioration assez pauvre et ils n'ont pas pu fournir un nombre optimal des Clusters Head (CH) à cause de leur nature de distribution et de sélection et de ces Clusters Head.

La répartition inégale des CH par tour dans le cas de LEACH and Ravi T. montre un impact négatif sur la gestion de trafic du réseau qui provoque ainsi des pertes en paquet de la transmission de TDMA insuffisante.

Aussi, DIETY est stable lorsque le nombre de CH varie de 30 à 50 parce que si nous accroissons le nombre CH (incluant que le Vice-Cluster Head de groupe devient Cluster Head pour la transmission), alors il ressort que les nœuds qui ne sont pas têtes

de groupes deviennent têtes de groupes, localement, pour réaliser l'agrégation des données.

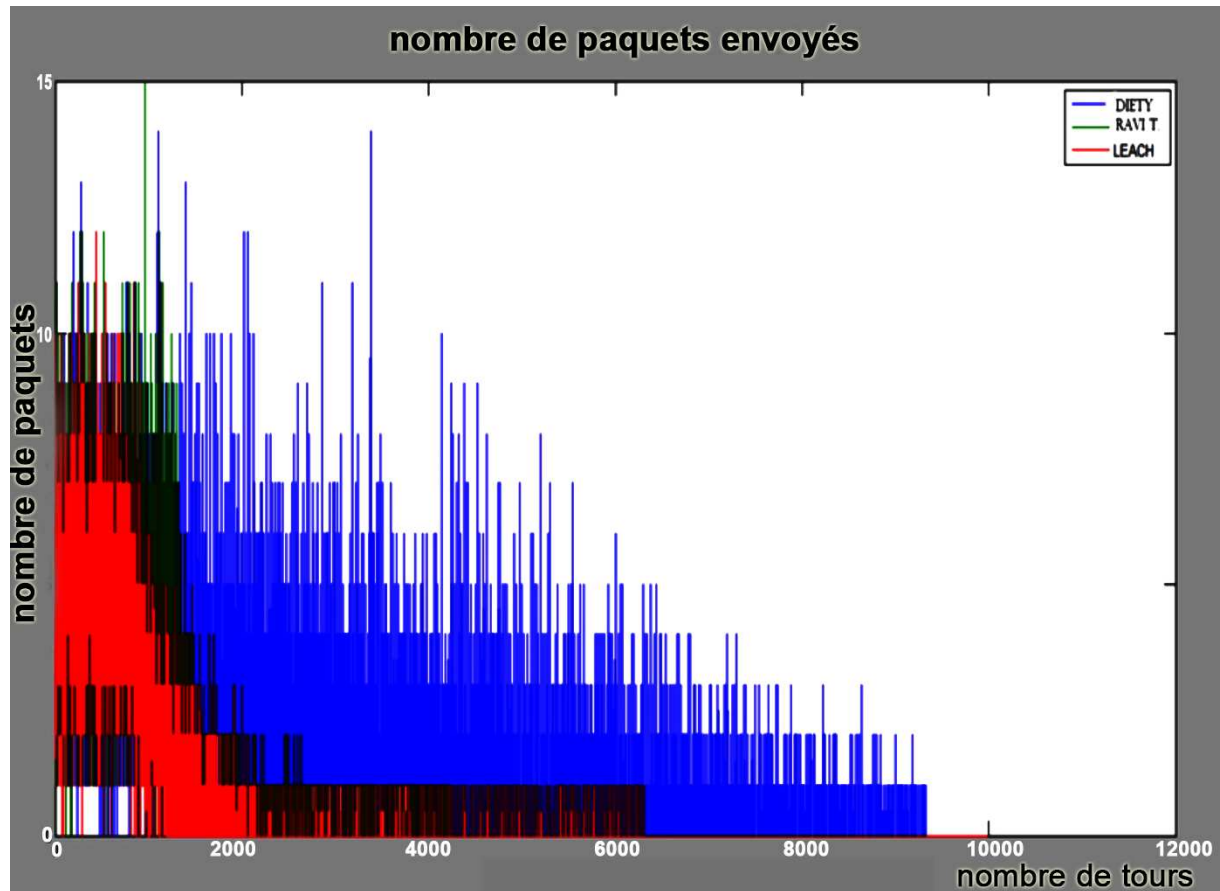


Figure 3.5: Nombre de paquets transmis à la station de base

L'évolution du nombre de paquets transmis à la station de base est représentée sur la figure 3.5.

Nous constatons que :

- ❖ Entre 0 et 700 tours, le nombre de paquets transmis diminue, très faiblement, pour chacun des trois protocoles LEACH, RAVI TOMAR et DIETY. Le nombre de paquets transmis à la station de base reste supérieur à 90 au cours des 700 premiers tours.
- ❖ Entre 700 et 1 400 tours, le nombre de paquets transmis par le protocole LEACH et le protocole RAVI TOMAR chute brusquement.

Il est à préciser que le protocole LEACH est celui dont le nombre de paquets transmis passe en dessous de 50 en premier lieu. Il transmet moins de 50 paquets après 900 tours.

Quant au protocole RAVI TOMAR, malgré la décroissance rapide du nombre de paquets transmis à partir de 1 000 tours, il transmet plus de 50 paquets avant 1 200 tours et transmet moins de 50 paquets après 1 200 tours.

S'agissant du protocole DIETY, son nombre de paquets transmis reste toujours supérieur à 90 entre 0 et 1 400 tours.

❖ Entre 1 400 tours et 2 500 tours, le nombre de paquets transmis est en dessous de 10 pour chacun des protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

Mais après 2 500 tours, le protocole LEACH et le protocole RAVI TOMAR ne transmettent plus de paquets à la station de base. En ce qui concerne le protocole DIETY, le nombre de paquets transmis reste supérieur à 80 entre 1 400 tours et 2 500 tours.

En outre, on observe une décroissance rapide du nombre de paquets transmis à partir de 2 400 tours.

❖ Le protocole DIETY est le seul protocole dont les nœuds capteurs transmettent des données après 2 500 tours. Il transmet plus de 50 paquets avant le 5000^{ième} tour et moins de 50 paquets après le 5000^{ième} tour. Il ne transmet plus après 9 500 tours.

En dehors de l'intervalle de tours [0 ; 1300] où le graphe du protocole DIETY est, largement, en dessous de ceux de LEACH et de RAVI TOMAR, le graphe du protocole DIETY est, après cela, très largement, au-dessus des autres graphes.

Cela signifie que le nombre de paquets transmis par le protocole DIETY est supérieur au nombre de paquets transmis par chacun des protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

La figure 3.5 montre l'évolution du nombre de paquets transmis à la station de base en fonction du nombre de tours sur l'intervalle [[1 : 10000]]. On peut noter que le protocole DIETY envoie beaucoup plus de paquets par rapport aux protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

Nous observons précisément que :

- Entre 0 tour et 700 tours, le nombre de paquets transmis diminue très faiblement pour chacun des trois protocoles. Pendant les 700 premiers tours, le nombre de paquets transmis à la station à la station reste supérieur à 90. Cela s'explique par le fait qu'entre 0 tour et 700 tours, le nombre de nœuds capteurs perdus par protocole est négligeable. Dans cet intervalle, nous avons un nombre important de nœuds capteurs émetteurs.
- Entre 700 tours et 1400 tours, le nombre de paquets transmis par les protocoles LEACH ET RAVI TOMAR chute brusquement. Cette chute est due à la perte élevée des nœuds capteurs entre 700 tours et 1400 tours pour ces deux protocoles. Par la suite, le protocole LEACH est le premier à perdre la moitié de ses nœuds capteurs et son nombre de paquets transmis passe en-dessous de 50 en premier. A partir 900^{ième} tour, il transmet moins de 50 paquets.
- Quant au protocole RAVI TOMAR, malgré la décroissance rapide du nombre de paquets transmis à partir de 1000 tours, il transmet plus de 50 paquets avant 1200 tours. Au-delà cela passe à moins de 50 paquets transmis.
- Le nombre de paquets transmis par le protocole DIETY reste supérieur à 90 entre 0 tour et 1400 tours. Il fournit un taux d'amélioration de paquets transmis allant de 20% à 98% sur l'intervalle de tours [[900 : 1400]].
- Entre 1400 tours et 2500 tours, le nombre de paquets transmis est en-dessous de 10 pour le protocole LEACH et RAVI TOMAR. Dans cet intervalle les deux protocoles perdent pratiquement tous leurs nœuds capteurs, ce qui fait qu'il y'a peu de transmission de paquets. Pour le protocole DIETY, le nombre de paquets transmis reste supérieur 80 pendant ce temps.
- En outre, on observe une décroissance rapide du nombre de paquets transmis par le protocole DIETY à partir de 2400 tours qui est due à la perte progressive des nœuds capteurs. Il fournit une amélioration allant de 50% à 98% sur l'intervalle de tours [[1400 : 2500]].

- A partir de 2500 tours, les protocoles LEACH et RAVI TOMAR ne peuvent plus transmettre de paquets à la station de base car ils perdent tous leurs nœuds capteurs. Le protocole DIETY est le seul à transmettre des paquets à la station de base. Soit plus de 50 paquets transmis avant 5000 tours.
- Au-delà de 5000 tours, le protocole DIETY transmet moins de 50 paquets et arrête de transmettre à partir de 9500 tours car il ne possède plus de nœuds capteurs.
- En dehors de l'intervalle de tours $[0 : 1300]$ où le graphe du protocole DIETY est en dessous des deux autres protocoles, après cela, le graphe du protocole DIETY est largement au-dessus des autres graphes. Le nombre de paquets transmis par le protocole DIETY est élevé à celui des autres protocoles LEACH et RAVI TOMAR. En termes de durée d'envoi, le protocole DIETY transmet plus longtemps et offre une meilleure optimisation de la durée d'envoi des paquets à la station de base. Il fournit 280% d'amélioration que les autres protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

III.6.4 Nombre de Cluster Head par tour

La figure 3.6 décrit l'évolution du nombre de Cluster Head (CH) par tour pour chacun des trois protocoles : LEACH, RAVI TOMAR et DIETY. Elle permet en fonction des intervalles de dire:

❖ Entre 0 et 700 tours, le nombre de nœuds chefs diminue, très faiblement, pour chacun des trois protocoles : LEACH, RAVI TOMAR et DIETY.

Dans cet intervalle de tours $[0 ; 700]$, l'effectif des CH Cluster Head transmetteurs des informations reste supérieur à 9.

❖ Dans l'intervalle de tours $[700 ; 1400]$, le nombre de CH Cluster Head transmetteurs d'informations pour le protocole LEACH et le protocole RAVI TOMAR chute brusquement.

Nous remarquons que le protocole LEACH est celui dont le nombre de CH Cluster Head passe en dessous de 5 en premier lieu. Le protocole LEACH a moins de 5 nœuds chefs après 900 tours.

Quant au protocole RAVI TOMAR, malgré la décroissance rapide à partir de 1 000 tours du nombre de nœuds chefs transmetteurs d'informations, il a plus de 5 Cluster Head avant 1 200 tours et moins de 5 Cluster Head après 1 200 tours.

En ce qui concerne le protocole DIETY, son nombre de Cluster Head reste toujours supérieur à 9 entre 0 et 1 400 tours.

❖ Dans l'intervalle de tours [1400 ; 2500], le nombre de Cluster Head passe de 1 à 0 par tour pour chacun des protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

Donc après 2 500 tours ni le protocole LEACH ni le protocole RAVI TOMAR ne possèdent un nœud chef transmetteur d'informations.

En ce qui concerne le protocole DIETY, le nombre de Cluster Head reste supérieur à 8 dans l'intervalle de tours [1400 ; 2500].

Par ailleurs, on observe une décroissance rapide (non brusque) du nombre de Cluster Head à partir de 2 400 tours. Le protocole DIETY est le seul protocole possédant encore des Cluster Head transmetteurs d'informations après 2 500 tours. Il possède plus de 5 nœuds chefs avant 5 000 tours et moins de Cluster Head après 5 000 tours. Il perd tous ses Cluster Head après 9 500 tours effectués.

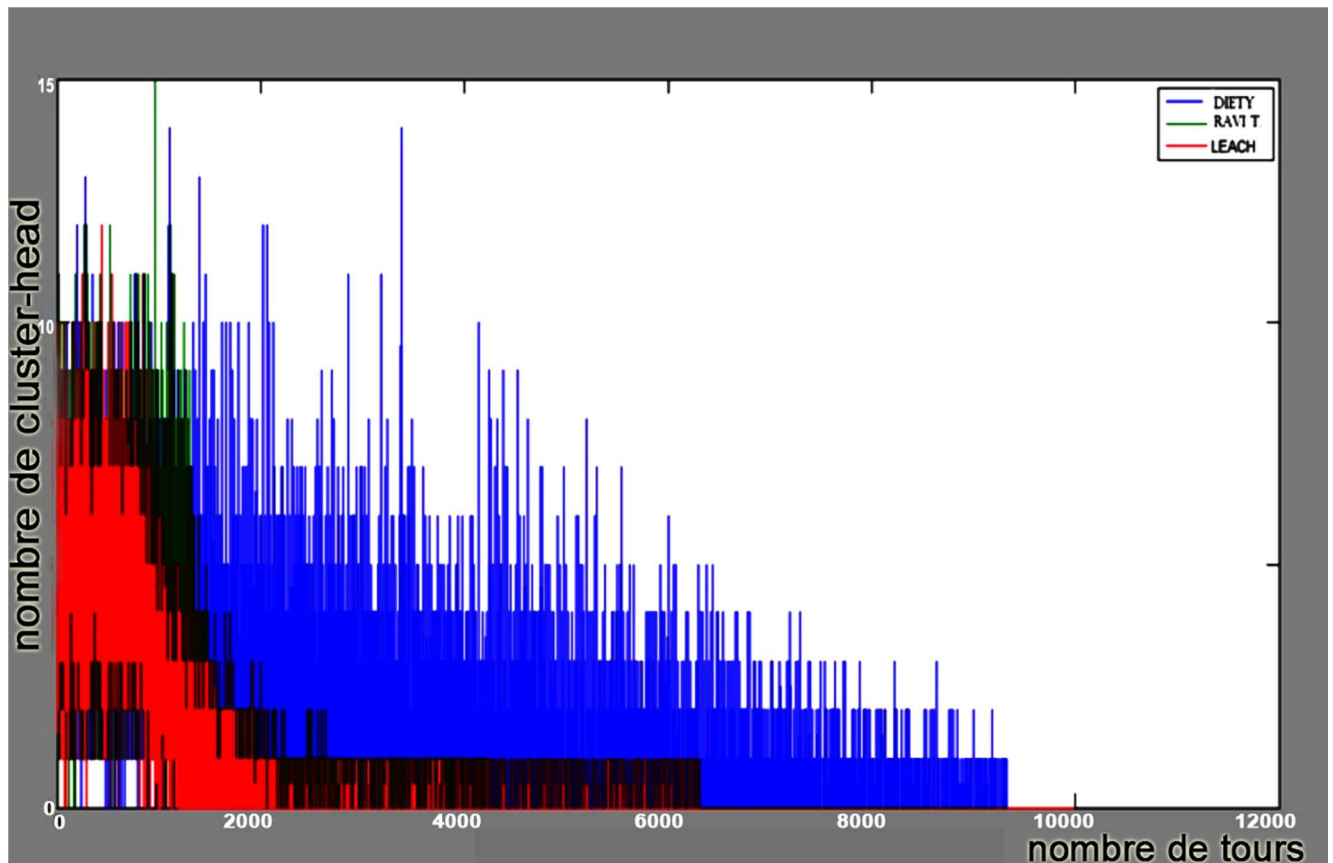


FIGURE 3.6 : NOMBRE DE CLUSTERS HEAD PAR TOUR ENTRE LES PROTOCOLES DIETY, RAVI T ET LEACH

En dehors de l'intervalle de tours [0 ; 1300] où le graphe du protocole DIETY est, légèrement, en dessous et de ceux de LEACH et de RAVI TOMAR, le protocole DIETY a un graphe, largement, au-dessus des graphes des autres protocoles.

Cela signifie que le nombre de Cluster Head pour le protocole DIETY est, globalement, supérieur au nombre de Cluster Head pour chacun des protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

La figure 3.6 montre l'évolution du nombre de Clusters Head par tour pour chacun des trois protocoles : LEACH, RAVI TOMAR, DIETY.

En dehors de l'intervalle de tours [[0 : 1300]], où le graphe du protocole DIETY est légèrement en-dessous de ceux de LEACH et de RAVI TOMAR, le protocole DIETY a un graphe bien meilleur que les autres. Cela montre que le nombre de Clusters Head

du protocole DIETY est globalement supérieur au nombre de Clusters Head des deux autres protocoles.

La légère infériorité du nombre de Clusters Head sur cet intervalle se justifie par le fait qu'au démarrage tous les nœuds capteurs Clusters Head ne sont pas actifs. Ils le sont après épaulés par des Vices Clusters Head. Ce qui n'est pas le cas pour les autres protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

Les protocoles LEACH et RAVI TOMAR épuisent rapidement leur Cluster Head au démarrage avant 1300 tours et ils ne sont pas épaulés.

Le protocole DIETY fournit en termes de nombre de Clusters Head une amélioration allant de 20% à 98% dans cet intervalle de tour [[1300 : 6500]].

III.6.5 Nombre de nœuds morts par tour

Le processus de transmission des informations occasionne la perte progressive des nœuds chefs émetteurs. Un Cluster Head ou un nœud capteur meurt par insuffisance d'énergie et donc impossible pour lui de transmettre dès que son énergie s'épuise totalement. Cette perte progressive des nœuds, est représentée dans la figure 3.7.

Pour chacun des trois protocoles LEACH, RAVI TOMAR et DIETY, nous représentons la perte progressive des nœuds sur la même figure, en vue de les comparer par intervalle de tours.

❖ Entre 0 et 700 tours, nous observons une perte du nombre de nœuds chefs pour chacun des trois protocoles : LEACH, RAVI TOMAR et DIETY.

Dans cet intervalle de tours [0 ; 700], le nombre de nœuds perdus ne dépasse pas 4 pour chacun des trois protocoles : LEACH, RAVI TOMAR et DIETY.

❖ Dans l'intervalle de tours [700 ; 1400], le nombre de nœuds perdu par le protocole LEACH et le protocole RAVI TOMAR passe de 4 à 9 nœuds.

Signalons que le protocole LEACH est celui qui a perdu 50 nœuds, soit la moitié de ses nœuds en premier lieu. Il perd cette moitié après 900 tours.

Quant au protocole RAVI TOMAR, malgré la croissance rapide du nombre de nœuds perdus, ce nombre est inférieur à 50 nœuds avant 1 200 tours et devient supérieur à 50 nœuds après 1 200 tours.

En ce qui concerne le protocole DIETY, son nombre de nœuds perdu reste toujours inférieur à 5 entre 0 et 1 400 tours.

❖ Dans l'intervalle [1400 ; 2500], le nombre de nœuds perdus passe de 90 à 100 pour les protocoles LEACH et RAVI TOMAR. Ces deux protocoles perdent tous leurs nœuds après 2 500 tours.

Concernant le protocole DIETY, le nombre de nœuds perdu reste inférieur à 15 dans ce même intervalle de tours.

Par ailleurs, on observe une croissance rapide (non brusque) du nombre de nœuds perdus à partir de 2 500 tours.

Le protocole DIETY est le seul protocole n'ayant pas perdu tous ses nœuds jusqu'après 2 500 tours. Il perd moins de 50 nœuds (c'est-à-dire la moitié des nœuds) avant 5 000 tours et perd plus de 50 nœuds après 5 000 tours. Il perd la totalité de ses nœuds après 9 500 tours.

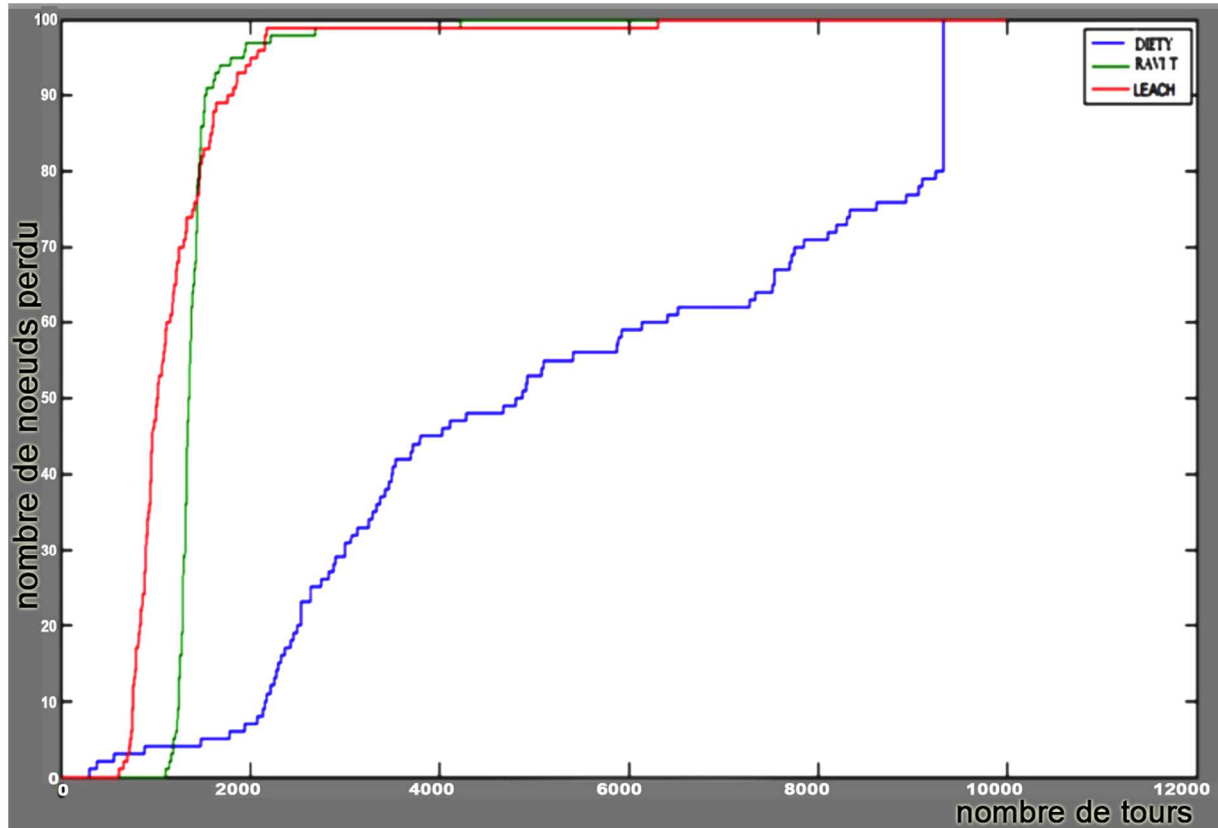


FIGURE 3.7 : NOMBRE DE NŒUDS MORTS PAR TOUR ENTRE LES PROTOCOLES : DIETY, RAVI T. ET LEACH

En dehors de l'intervalle de tours $[0 ; 1300]$ où le graphe du protocole DIETY est, légèrement, au-dessus de ceux de LEACH et de RAVI TOMAR, le graphe du protocole DIETY est, largement, au-dessus des graphes des deux autres protocoles.

Cela signifie que le nombre de nœuds perdus par le protocole DIETY est, globalement, inférieur au nombre de nœuds perdus par les protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

La figure 3.7 montre l'évolution du nombre de nœuds morts par tour entre les protocoles DIETY, RAVI TOMAR et LEACH en fonction du nombre de tours.

Nous observons que les évolutions des courbes de LEACH et RAVI TOMAR sont au-dessus de celle de DIETY sur presque tout l'intervalle $[1 ; 10\ 000]$.

En effet :

- Entre 0 et 700 tours, nous observons une faible perte du nombre de nœuds chefs pour chacun des trois protocoles : LEACH, RAVI TOMAR et DIETY.

Dans cet intervalle de tours $[0 ; 700]$, le nombre de nœuds perdu ne dépasse pas 4 pour chacun des protocoles : LEACH, RAVI TOMAR et DIETY.

La courbe du protocole DIETY est légèrement au-dessus des autres courbes c'est-à-dire que le protocole DIETY perd un peu plus de nœud juste après le démarrage que les protocoles LEACH et RAVI TOMAR. Cela s'explique par l'utilisation, des nœuds sous-chef qui, ayant moins d'énergie, peuvent être perdu plus facilement. Cependant le pourcentage de perte de nœud, relativement aux autres protocoles, ne dépassent pas 4%.

- Dans l'intervalle de tours [700 ; 1400], le nombre de nœud perdu par le protocole LEACH et le protocole RAVI TOMAR passe de 4 à 90 nœuds.

Signalons que le protocole LEACH est celui qui a perdu 50 nœuds, soit la moitié de ses nœuds en premier lieu. Il perd cette moitié après 900 tours.

Quant au protocole RAVI TOMAR, malgré la croissance rapide du nombre de nœuds perdus, ce nombre est inférieur à 50 nœuds avant 1200 tours et devient supérieur à 50 nœuds après 1200 tours.

Cette perte rapide des nœuds dans l'intervalle de tours [700 ; 1400] est justifiée par le fait que tous les clusters Head émettent des paquets à la station de base sans être épaulés.

Ainsi, ils s'épuisent tous presque au même moment. En ce qui concerne le protocole DIETY, son nombre de nœuds perdu reste toujours inférieur à 5 entre 0 et 1400 tours.

Cela s'explique par le fait que les clusters Head sont aidés dans leurs tâches par des Vice-Clusters Head.

A l'aide des Vice-Clusters Head dans le protocole DIETY, nous avons plus d'émetteurs et chacun fourni moins d'énergie contrairement aux protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

Du coup le protocole DIETY perd moins et lentement ses nœuds par rapport aux protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

Les résultats de la figure 3.7 montrent que le protocole DIETY améliore relativement à la perte de nœuds les protocoles LEACH et RAVI TOMAR de 20% à 98 % sur l'intervalle 900 tours à 1400 tours.

- Dans l'intervalle de tours [1400 ; 2500], le nombre de nœuds perdu passe de 90 à 100 pour les protocoles LEACH et RAVI TOMAR. Ces deux protocoles perdent tous leurs nœuds après avoir effectué 2500 tours.

Concernant le protocole DIETY, le nombre de nœuds perdus reste inférieur à 15 dans ce même intervalle de tours.

Par ailleurs, on observe une croissance rapide (non brusque) du nombre de nœuds perdus à partir de 2500 tours.

Le protocole DIETY est le seul protocole n'ayant pas perdu tous ses nœuds jusqu'après 2500 tours. Il perd moins de 50 nœuds (c'est-à-dire la moitié des nœuds) avant 5000 tours et perd plus de 50 nœuds après 5000 tours. Il perd la totalité de ses nœuds après 9500 tours.

La capacité du protocole DIETY à posséder des nœuds après 2500 tours, contrairement aux autres protocoles, est le résultat de la prise en compte des Vices-clusters Head. En dehors de l'intervalle de tours [0 ; 1300] où le graphe du protocole DIETY est, légèrement, au-dessus de ceux de LEACH et de RAVI TOMAR, le graphe du protocole DIETY est, largement en dessous des graphes des deux autres protocoles.

Cela signifie que le nombre de nœuds perdu par le protocole DIETY est, globalement, inférieur au nombre de nœuds perdus par les protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

Relativement à la protection des nœuds, le protocole DIETY fournit une amélioration allant de 20% à 98% des protocoles LEACH et RAVI TOMAR.

Relativement à la durée d'existence des nœuds, le protocole DIETY fournit une amélioration de 38%.

CONCLUSION

Plusieurs protocoles ont été développés pour minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans-fil. Dans ce chapitre, nous avons présenté une description détaillée d'une nouvelle méthode qui se base sur le principe des nœuds capteurs actifs / passifs.

Elle utilise la technique d'agrégation des données pour minimiser la consommation d'énergie, accroître la capacité du réseau pour transmettre plus de données à la station de base. Augmenter également, la durée de vie de réseau de capteurs sans-fil.

A travers les résultats des simulations, nous pouvons conclure que notre méthode minimise la consommation d'énergie au niveau des nœuds capteurs et augmente la durée de vie du réseau des capteurs sans-fil.

**CHAPITRE IV : AMELIORATION DU
PROTOCOLE AODV DU STANDARD
ZIGBEE**

Introduction

Le routage dans les réseaux sans-fil classiques reste une tâche difficile en raison du paradigme ad hoc de ces réseaux ainsi que la nature du support utilisé. Néanmoins dans les réseaux de capteurs sans-fil (RCSF), il devient plus difficile en raison des contraintes des nœuds capteurs et de la nature de l'environnement imprévisible et hostile. Dans ce chapitre nous allons présenter le protocole AODV et AODV amélioré notre version, qui prend en compte le modèle de trafic du plus court chemin au sein du réseau de capteurs sans-fil.

IV.1 Protocole AODV

IV.1.1 Définition

AODV (Ad hoc On demand Distance Vector) est un protocole de routage conçu par Charles E. Perkins et Elizabeth M. Royer. C'est un protocole basé sur le principe des vecteurs de distance et appartient à la famille des protocoles réactifs.

Il représente essentiellement une amélioration de l'algorithme proactif DSDV mais réduit le nombre de diffusions de messages en ne calculant les routes que sur demande (AODV).

Ce protocole utilise les deux mécanismes "découverte de route" et "maintenance de route", en plus du routage "nœud par nœud", le principe des numéros de séquence et l'échange périodique du DSDV.

AODV utilise le principe des numéros de séquence afin de maintenir la consistance des informations de routage. A cause de la mobilité des nœuds dans les réseaux mobiles ad hoc, les routes changent fréquemment. Ce qui fait que les routes maintenues par certains nœuds, deviennent invalides. Les numéros de séquence permettent d'utiliser les routes les plus nouvelles ou plus fraîches.

IV.1.2 Table de routage et paquets de contrôle

AODV maintient les chemins d'une façon distribuée en gardant une table de routage, au niveau de chaque nœud de transit appartenant au chemin cherché. Une entrée de la table de routage contient essentiellement :

- ❖ L'adresse IP de la destination.
- ❖ Le nœud suivant.
- ❖ La distance en nombre de nœuds.
- ❖ Le numéro de séquence destination qui garantit qu'aucune boucle ne peut se former.
- ❖ Liste des voisins actifs.
- ❖ Le temps d'expiration de l'entrée de la table.

- ❖ Un tampon de requête afin qu'une seule réponse soit envoyée par requête.

A chaque utilisation d'une entrée, son temps d'expiration est remis à jour. Si une nouvelle route est nécessaire, ou une route disparaît, la mise à jour de ces tables s'effectue par l'échange de trois types de messages entre les nœuds capteurs:

- ❖ RREQ (Route Request): Message de demande de route.
- ❖ RREP (Route Reply): Message de réponse à un RREQ.
- ❖ RERR (Route Error): Message qui signale la perte d'une route.

Le format des paquets Figure 4.1 est donné ci-dessous:

- RREQ: contient essentiellement les champs suivants :

TABLEAU 4.1: FORMAT DE MESSAGE RREQ

Type	J	R	G	D	U	Reserved	Hop Count
RREQ ID							
Destination IP Address							
Destination Séquence Number							
Originator IP Address							
Originator Séquence Number							

- ❖ Type (8 bits): ce champ indique le type de paquet, dans ce cas il prend la valeur 1
- ❖ Flags (drapeaux) (5 bits): ce champ contient cinq flags (J, R, G, D, U).
- ❖ Reserved (11 bits): initialisé à la valeur 0 et ignoré à la réception du message.
- ❖ Hop Count (8 bits): il contient le nombre de sauts parcourus par RREQ.-
RREQID: il identifie la requête parmi les requêtes envoyées par la même source.
- ❖ Destination IP Address : l'adresse IP de destination pour laquelle une route est désirée.
- ❖ Destination Séquence Number : Le dernier numéro de séquence reçu dans le passé pour n'importe quelle route vers la destination.

- ❖ Originator IP Adress : l'adresse IP de la source de la requête.
- ❖ Originator Sequence Number : Le nombre de séquence courant de la source contenue dans la table de routage de ce nœud capteur.
- ❖ RREP: contient Figure 4.2 essentiellement les champs suivants

TABLEAU 4.2 : FORMAT DE MESSAGE RREP

Type	R	A	Reserved	Hop Count
Destination IP Address				
Destination Séquence Number				
Originator IP Address				
Lifetime				

- ❖ Type (8 bits): ce champ indique le type de paquet, dans ce cas il prend la valeur 2.
- ❖ Flags (drapeaux) (2 bits)-Préfix Sz (5 bits): si la valeur de ce champs est différente de zéro, ce dernier indique que le nœud prochain peut être utilisé pour chaque nœud demandant cette destination et qui possède la même valeur de Préfix Sz.
- ❖ Hop Count (8 bits): il contient le nombre de sauts entre la source jusqu'à la destination.
- ❖ Destination IP Address : l'adresse IP de la destination du paquet RREQ.-
Destination Sequence Number : le numéro de séquence de la destination associé à cette route.
- ❖ Originator IP Adress : l'adresse IP du nœud qui crée la requête.
- ❖ Lifetime : le temps pour lequel chaque nœud qui reçoit RREP considère que la route est valide.
- ❖ RERR : Un message d'erreur de route contient Figure 4.3 essentiellement les champs suivants :

TABLEAU 4.3 :FORMAT DE MESSAGE RERR.

Type	N	Reserved	DectCount
Type N Reserved DectCount			
Type N Reserved DectCount			

- ❖ Type (8 bits): la valeur de ce champ prend 3 dans le message RERR.
- ❖ Flag (1 bits): il contient un drapeau (N: No delete flag), celui-ci est indicatif lorsqu'un nœud est capable de réparer le lien, et informe les nœuds suivants qu'ils ne doivent pas supprimer le chemin.
- ❖ Reserved (15 bits): initialisé à la valeur 0 et ignoré à la réception du message.
- ❖ Dest Count (8 bits): il indique le nombre de destinations inaccessibles incluses dans ce message. Ce champ doit être supérieur ou égal à un.
- ❖ Unreachable Destination IP Address : l'adresse IP des destinations inaccessibles pour la raison de cassure de lien.
- ❖ Unreachable Destination Sequence Number : le nombre de séquence de la liste des destinations inaccessibles qui se trouve dans le champ Unreachable
- ❖ Destination IP Address.

IV.1.3. Principe de fonctionnement

a) Numéros de séquences

Dans AODV, chaque nœud maintient une table qui contient une entrée pour chaque destination accessible. Pour éviter le problème du comptage à l'infini, AODV utilise les numéros de séquences dans les tables de routage en plus de la distance. Chaque nœud possède un numéro de séquence, il est le seul habilité à l'incrémenter. Ce numéro personnel est incrémenté dans les cas suivants :

Avant d'entreprendre un processus de recherche de route, le nœud incrémente son numéro. Avant de répondre à un message RREQ par un message RREP, le numéro de

séquence doit être remplacé par la valeur maximale entre son numéro de séquence actuel et celui contenu dans le message RREQ.

Afin de garantir la création de route sans boucles, la mise à jour de la table de routage dans l'AODV ne s'effectue que dans les cas suivants : Le numéro de séquence du paquet de contrôle est strictement supérieur au numéro de séquence présent dans la table. Les numéros de séquence (de la table et du paquet) sont égaux mais, la distance en nombre de sauts du paquet plus 1 est inférieure à la distance actuelle dans la table de routage. Le numéro de séquence pour cette destination est inconnu.

b) Découverte d'une route

Un nœud diffuse une requête de route (RREQ) pour connaître la route vers une certaine destination si celle-ci n'est pas connue au préalable figure 4.1, ou si le chemin existant vers la destination a expiré ou il est devenu défaillant. Le champ numéro de séquence de destination du paquet RREQ, contient la dernière valeur connue du numéro de séquence, recopiée de la table de routage. Si le numéro de séquence n'est pas connu, la valeur nulle sera prise par défaut.

Le numéro de séquence source du paquet RREQ contient la valeur du numéro de séquence du nœud source Figure 4.1. Après la diffusion du RREQ, la source attend le paquet réponse de route (RREP). Si ce dernier n'est pas reçu durant une certaine période (appelée RREP_WAIT_TIME), la source peut rediffuser une nouvelle requête RREQ. Quand un nœud de transit (intermédiaire) envoie le paquet de la requête à un voisin, il sauvegarde aussi l'identificateur du nœud à partir duquel la première copie de la requête est reçue.

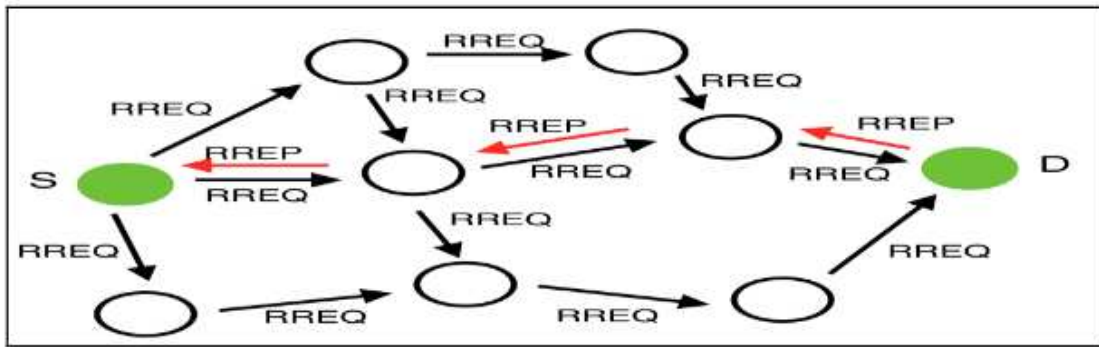


FIGURE 4.1: METHODE DE CONSTRUCTION D'UNE ROUTE

Cette information est utilisée pour construire le chemin inverse, qui sera traversé par le paquet réponse route de manière unicast. Puisque le paquet RREP va être envoyé à la source, les nœuds appartenant au chemin de retour vont modifier leurs tables de routage suivant le chemin contenu dans le paquet de réponse (temps d'expiration, numéro de séquence le prochain saut).

Afin de limiter le coût dans le réseau, AODV propose d'étendre la recherche progressivement. Initialement, la requête est diffusée à un nombre de sauts limité. Si la source ne reçoit aucune réponse après un délai d'attente déterminé, elle retransmet un autre message de recherche en augmentant le nombre maximum de sauts. En cas de non réponse, cette procédure est répétée un nombre maximum de fois avant de déclarer que cette destination est injoignable. A chaque nouvelle diffusion, le champ Broadcast ID du paquet RREQ est incrémenté pour identifier une requête de route particulière associée à une adresse source.

Si la requête RREQ est rediffusée à un certain nombre de fois (RREQ_RETRIES) sans la réception de réponse, un message d'erreur est délivré à l'application. La destination renvoie un message RREP, ce message peut donc être acheminé vers la source. Chaque nœud traversé incrémentera le nombre de sauts. Et ajoutera une entrée à sa table pour la destination.

Une réponse adéquate peut aussi être donnée par un nœud situé entre la source et la destination. Dans ce cas l'obtention de routes bidirectionnelles est néanmoins possible

grâce au drapeau " Gratuitous RREP". Le nœud intermédiaire enverra alors en plus un RREP vers la destination. Les nœuds entre le nœud intermédiaire et la destination ajouteront à leur table, une entrée vers la source du RREQ. Cette disposition permettra à la destination d'envoyer directement des paquets à la source sans devoir procéder à la recherche d'une route.

c) Maintenance des routes

Afin de maintenir des routes consistantes, une transmission périodique du message "HELLO" est effectuée. Si trois messages "HELLO" ne sont pas reçus consécutivement à partir d'un nœud capteur voisin, le lien en question est considéré comme défaillant. Les défaillances des liens sont, généralement, dues à la mobilité du réseau ad hoc.

Les mouvements des nœuds qui ne participent pas dans le chemin actif, n'affectent pas la consistance des données de routage. Quand un lien, reliant un nœud p avec le nœud qui le suit dans le chemin de routage, devient défaillant, le nœud p diffuse un paquet UNSOLICITEDRREP, avec une valeur de numéro de séquence égale à l'ancienne valeur du paquet RREP incrémentée, et une valeur infinie de la distance. Le paquet UNSOLICITED RREP est diffusé aux voisins actifs, jusqu'à ce qu'il arrive à la source. Une fois le paquet est reçu, la source peut initier le processus de la découverte de routes. AODV maintient les adresses des voisins à travers lesquels les paquets destinés à un certain nœud capteur arrivent. Un voisin est considéré actif, pour une destination donnée, s'il délivre au moins un paquet de données sans dépasser une certaine période (appelée active timeout période).

Une entrée de la table du routage est active, si elle est utilisée par un voisin actif. Le chemin reliant la source et la destination en passant par les entrées actives des tables de routage, est dit chemin actif. En cas de défaillances de liens, toutes les entrées des tables de routage participantes dans le chemin actif qui sont concernées par la défaillance sont supprimées. Cela est accompli par la diffusion d'un message d'erreur

entre les nœuds capteurs actifs. La maintenance peut être résumée en trois points suivants :

- ❖ Des messages HELLO périodiques pour détecter les coupures de liens.
- ❖ Si la source se déplace, la procédure de détermination de route peut être réinitialisée.
- ❖ Si un nœud intermédiaire ou la destination se déplace, un RREP spécial est émis au nœud source (reconstruisant la route au passage).

d) Gestion de la connectivité locale

Lorsqu'un nœud reçoit un paquet en Broadcast, il met à jour ses informations de connectivité locale pour s'assurer qu'elles incluent ce voisin. Si aucun paquet n'est émis aux voisins actifs pendant le dernier hello_interval, un nœud va envoyer un hello (RREP non sollicité) contenant :

- ❖ son identité.
- ❖ son numéro de séquence (non modifié pour les hello).
- ❖ time to live de 1 pour ne pas être retransmis.
- ❖ Liste des nœuds pour lesquels il a reçu un hello.

IV.1.4 Avantages et inconvénients d'AODV

Des études comparatives montrent que le protocole AODV convient aux réseaux à forte mobilité. Parmi les inconvénients du protocole de routage AODV, il n'assure pas l'utilisation du meilleur chemin existant entre la source et la destination.

Cependant, des évaluations de performances récentes ont montré, qu'il n'y a pas de grandes différences (en terme d'optimisation) entre les chemins utilisés par le protocole AODV et ceux utilisés par les protocoles basés sur les algorithmes de recherche des plus courts chemins. L'avantage de ce protocole est qu'il ne présente pas de boucle de routage et évite le problème du "comptage à l'infini" de *Bellman Ford*.

Possibilité d'introduire la qualité de service dans AODV par l'ajout d'un champ dans les paquets de contrôle RREQ et RREP. Ce champ peut être associé au paramètre délai ou au paramètre bande passante. A la réception d'un message RREQ, chaque mobile vérifie qu'il est en mesure d'honorer le service demandé, avant de retransmettre le message.

IV.2 AODV optimisé pour le réseau de capteurs sans-fil

Dans le protocole de routage AODV conventionnel, les routes sont établies et maintenues sur la demande du nœud capteur source en diffusant un RREQ afin de découvrir toutes les routes possibles vers une destination donnée. Ce mécanisme est très pratique pour le réseau ad hoc mobile composé de dispositifs sans-fil ayant plus de ressources comparées aux réseaux de capteurs sans-fil. Aussi le modèle de trafic dans un réseau MANET est très souvent d'un nœud capteur vers un autre nœud, contrairement aux réseaux de capteurs sans-fil dont le modèle de trafic est de type plusieurs nœuds vers un nœud. Les spécifications de l'AODV conventionnel doivent être redéfinies et optimisées pour les réseaux de capteurs sans-fil, en tenant compte des caractéristiques suivantes:

- ❖ Le modèle de trafic des réseaux de nœuds qui est de type plusieurs vers un seul.
- ❖ Les contraintes des nœuds telles que la mémoire et la puissance de calcul.
- ❖ Les contraintes de bande passante.
- ❖ Le nombre de nœuds capteurs du réseau.

IV.2.1 Découverte des routes

En prenant en considération le modèle de trafic dans les réseaux de nœuds de type plusieurs vers un seul, la diffusion fréquente sur le réseau des requêtes RREQ pour établir un chemin avec la station de base engendre une surcharge de ce réseau et une dégradation de ses performances, sur un réseau à grande échelle composé de centaines de milliers de nœuds.

Pour surmonter cette lacune, une solution a été proposée permettant d'affecter la tâche de découverte de l'itinéraire par la station de base, qui lance périodiquement une requête RREQ sur le réseau destinée à informer chaque nœud de son emplacement. La requête RREQ est reçue et rediffusée par chaque nœud sur le réseau, pendant cette période chaque nœud met à jour sa table de routage et ajoute de nouvelles routes à sa table.

Toutes les entrées dans les tables de routage conduisent à la station de base. Cela est très approprié pour les réseaux de capteurs sans-fil, parce que seul le chemin vers la station de base est enregistré dans les tables de routage. Lors de la réception d'une requête RREQ, un nœud capteur vérifie s'il a déjà traité cette requête RREQ en utilisant le numéro de séquence tel que l'AODV conventionnel.

Si le RREQ est reçu pour la première fois, les nœuds récupèrent de cette RREQ le prochain saut pour atteindre la station de base. Ils incrémentent le numéro des sauts dans le RREQ et le rediffusent. Si le RREQ est déjà traité, elle sera ignorée. Après la diffusion de la RREQ, le nœud attend un délai prédéfini pour éviter le blocage du réseau et renvoie un RREP figure 4.2.

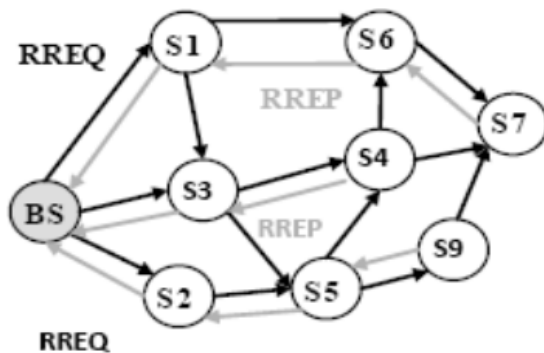


FIGURE 4.2: DECOUVERT DE ROUTE

IV.2.2 Table de routage

Bien que dans le réseau de capteurs sans-fil, le modèle de trafic est sous la forme de plusieurs vers un seul, dans lequel un ensemble de nœuds envoie périodiquement des mesures environnementales à la station de base. Chaque nœud sur le réseau a besoin d'une route vers la station de base. Ce qui signifie que la table de routage ne contiendra qu'une ou deux entrées ayant comme destination finale l'identifiant de la station de base.

Par conséquent, le protocole OADV optimisé conserve la même structure de la table de routage définie dans le protocole AODV conventionnel. Seules les entrées de la station de base sont conservées dans la table de routage, cela minimise la taille de l'espace mémoire occupée par la table de routage. Cet aspect est souhaité dans les réseaux de capteurs sans-fil, puisque la mémoire des capteurs n'est pas suffisante pour enregistrer de grosses tables de routage.

En raison des contraintes de la bande passante ainsi que du nombre croissant des nœuds dans les RCSF, la diffusion du Messages HELLO engendre le sur-chargement du réseau et l'épuisement des batteries des nœuds. Dans le protocole OAODV, les messages HELLO ne sont pas utilisés, la connectivité entre les nœuds est garantie en utilisant la requête RREQ envoyée périodiquement par la station de base, et garantit la mise à jour des tables de routage.

IV.2.3 Maintenance des routes

La maintenance des routes est traitée de la même manière que le protocole AODV conventionnel, le nœud qui détecte la défaillance de la route envoie un message RERR à la source qui attend la rediffusion du prochain RREQ, par la station de base afin d'obtenir une nouvelle route.

Un nœud attend un nouveau RREQ à partir de la station de base plutôt que de lancer son propre RREQ. La période de diffusion de la requête RREQ est fixée par

l'administrateur du réseau en fonction de la stabilité des nœuds et de l'environnement de déploiement.

IV.3 Procédure du réseau

La Figure 4.3 montre la procédure de l'établissement du réseau. Premièrement, la couche de réseau du coordinateur enverra le signal d'inspection de la chaîne d'énergie à la couche MAC. Elle va, automatiquement, vérifier s'il y a une chaîne d'énergie avec un niveau d'énergie permissible.

S'il n'y a pas une telle chaîne, elle fera un signal retour à la couche d'application, et s'il en existe, elle en choisira une convenable et la distribuer à une valeur d'identifiant de zone de réseau personnel (PANId : Personal Area Network ID). Elle va juger, s'il y a ou pas de conflit avec le PANId original [*Zhang Ling C, 2014*] [*Liu Chengyin et alliés, 2012*]. Si oui, une autre valeur aléatoire et unique sera encore obtenue.

Ensuite, La couche du réseau écrit cette valeur dans PANId de la couche MAC pour attribuer un identifiant à l'ensemble avec l'adresse du coordinateur. Enfin, la couche du réseau demande à la couche d'application d'opérer un nouveau réseau. Ainsi, le nœud capteur a établi un nouveau réseau accessible aux appareils.

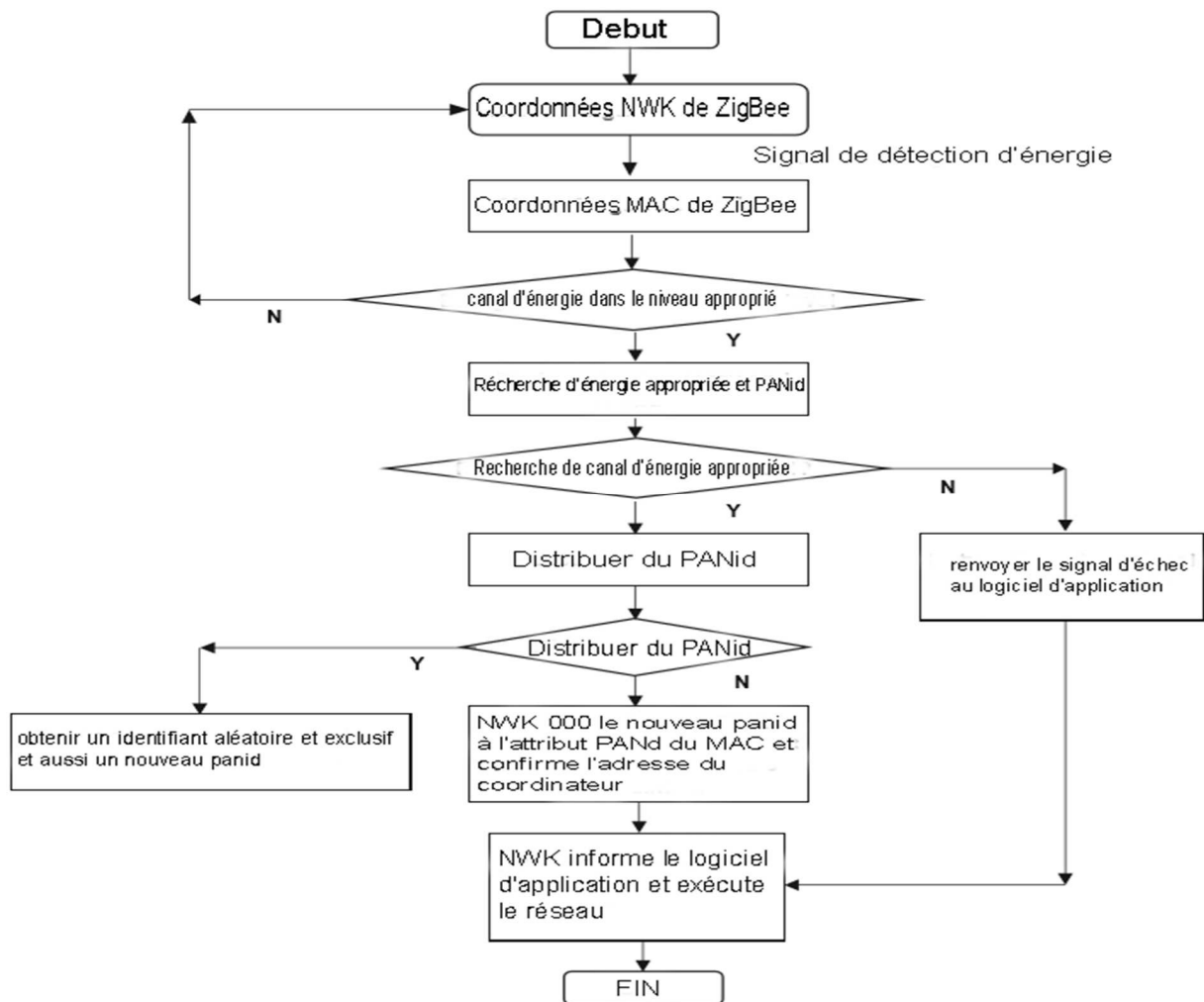


FIGURE 4.3 : PROCEDURE AU SEIN DU RESEAU [ZHANG LING C, 2014]

Nous présentons à la figure 4.3 le processus de fonctionnement (d'établissement du réseau).

Dans cet ordigramme, la couche MAC a pour rôle de générer un signal réseau du coordinateur, de recevoir des données de la couche réseau, de transmettre des données et de garantir une connexion, point à point dans le réseau.

Elle est responsable de l'adressage des données pour décider de la provenance ou de la destination et offre un contrôle d'accès multiple. Quant à la couche de réseau

(NWK), elle représente le cœur du « protocole ZIGBEE » et utilise la couche MAC avec pour fonction principale de contrôle et correction d'erreurs, d'adressage. Garantissant ainsi que le coordinateur et le routeur autoriseront les périphériques à se

connecter et à quitter le réseau en contrôlant le temps de déclenchement et de réception du récepteur. Elle fournit une interface entre la couche d'application et la couche MAC.

L'algorithme fonctionne comme suit :

Au commencement, la couche réseau (NWK) du coordinateur envoie un signal d'inspection de canal d'énergie à la couche MAC. La couche MAC vérifie, automatiquement, s'il existe un canal d'énergie ayant un niveau d'énergie admissible. S'il n'y a pas un tel canal, un signal sera envoyé à la couche application ;

S'il en existe un, elle le choisira, distribuera une valeur PANID et déterminera s'il existe un conflit avec l'APNID d'origine. Si oui, une autre valeur aléatoire et unique sera à nouveau obtenue.

Ensuite, la couche réseau écrit cette valeur dans l'attribut PANID de la couche MAC avec l'adresse du coordonnateur. Enfin, la couche réseau informe la couche application de l'exploitation d'un nouveau réseau. Ainsi le nœud a établi un nouveau réseau accessible aux périphériques.

IV.4 Protocole de routage et procédure de communication

Il existe deux types de protocoles de routage au niveau du standard ZigBee : AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) et l'algorithme de routage arborescent (TREE).

Le protocole F-AODVjr est version améliorée du protocole AODVjr [Liu Xiao hua et al, 2014], et le protocole AODVjr est une amélioration du protocole AODV.

Le protocole F-AODVjr a les avantages suivants :

- Basse consommation d'énergie
- Longue durée de vie des nœuds.
- Distinction parmi les nœuds en fonction de leur niveau d'énergie résiduelle.

Le protocole F-AODVjr, établit un seuil d'énergie $Ex(n)$ qui est mis à jour dynamiquement. Il décide que le nœud dont l'énergie est plus que $Ex(n)$ est considéré

comme le nœud à énergie suffisante, tandis que celui dont l'énergie est inférieure à $E_x(n)$ est considéré comme déficitaire.

Le nœud qui a une énergie suffisante sera utilisé pour transmettre les données, tandis que le nœud à énergie déficitaire est utilisé pour transmettre le paquet de données du nœud destinataire dans une ligne ou route particulière ou pour recevoir les données personnelles regroupées du nœud destinataire.

$E_x(n)$ se calcule selon la formule 4.1 suivante :

$$E_{x(n)} = \begin{cases} \varepsilon \sqrt{E_0} & n = 1 \\ E_{x(n-1)} - \frac{\sigma}{n} \sqrt{E_0} & 1 < n < N_{total} \end{cases} \quad (4.1)$$

Lorsque $n = 1$, alors $E_{x(1)} = \varepsilon \sqrt{E_0}$ et $E_{x(1)}$ est l'énergie départ initial réglée par le réseau, ε est le coefficient spécifique pour ajuster le réglage de l'énergie initial.

$E_x(n-1)$ est l'énergie départ avant la mise à jour et σ est un certain coefficient pour contrôler l'évolution de la décroissance d'énergie départ.

N_{total} est le nombre total de nœud. C 'est une sorte de constance pendant n est une variable. Soit deux compteurs intérieurs $C1$ et $C2$ pour le coordinateur de ZigBee.

S'il y a un nœud dont le reste d'énergie résiduelle est plus bas que la valeur actuelle $E_x(n)$, le coordinateur va alors envoyer l'information de ce nœud pour faire accroître la valeur du compteur $C1$ de 1.

Selon la valeur du compte de $C1$, le coordinateur peut calculer le nombre ratio Q des nœuds déficients et le total des nœuds.

Soit au départ *Ethreshold* (la valeur seuil) ($0 < E_{threshold} < 1$). Lorsque $Q > E_{threshold}$, le coordinateur fait accroître la valeur du compteur $C2$ de 1 et n est la valeur représentative du compteur $C2$. Ainsi, lorsque n change pour accroître de 1, la

valeur $E_x(n)$ finira une mise à jour. Ensuite, le compteur $C1$ passe 0 et le compteur $C2$ reste inchangé. Alors la valeur $E_x(n)$ peut être obtenue dans la formule 4.2 suivante:

$$\begin{cases} E_{x(1)} = \varepsilon \sqrt{E_0} \\ E_{x(2)} = E_{x(1)} - \frac{\sigma}{2} \times \sqrt{E_0} \\ \dots \\ E_{x(n)} = E_{x(n-1)} - \frac{\sigma}{n} \times \sqrt{E_0} = E_{x(1)} - \frac{\sigma}{2} \times \sqrt{E_0} - \dots - \frac{\sigma}{n} \times \sqrt{E_0} \end{cases} \quad (4.2)$$

On sait la méthode de calcul de $E_x(n)$, au stade initial du fonctionnement du réseau, l'énergie départ $E_x(n)$ décroît lentement et pendant n s'accroît, la ligne de décroissance de la valeur $E_x(n)$ est de plus en plus petite. Dans la dernière période, l'énergie du nœud est généralement insuffisante.

Le protocole F-AODVjr peut permettre à la plupart des nœuds de participer au routage de transmission comme des nœuds à énergie suffisante. Pour cela, son énergie décroissante devient de plus en plus lente.

Une telle méthode peut éviter la congestion du réseau causée par la petite quantité des nœuds, réduisant ainsi le gaspillage d'énergie [Zefeng Yi et alliés, 2015].

Le protocole de routage arborescent (TBRP Tree Based Routing Protocol) [Mrityunjay Singh et alliés, 2010] est une partie de la pile protocolaire ZigBee Figure 4.4.

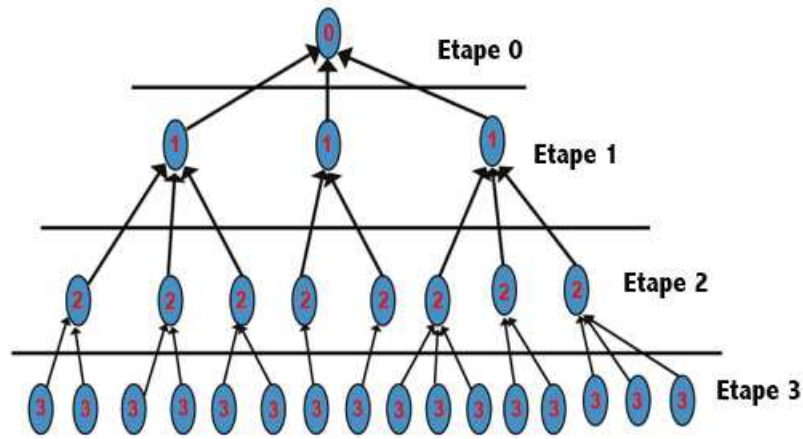


FIGURE 4.4: ARCHITECTURE TBRP [MRITYUNJAY ET ALLIES, 2010]

L'ensemble des nœuds dans le réseau forme un arbre avec différents niveaux et ces nœuds de l'arbre présentent quelques contraintes de degré du niveau du nœud. L'algorithme du protocole TBRP marche en trois phases : la phase de formation de l'arbre, la collection de données, et La phase de purification.

Dans la phase de formation de l'arbre, **étape 1**, la station de base diffuse un message initial qui contient l'information concernant la position de chaque station de base et la distance du niveau. Lorsqu'un nœud quelconque reçoit ce message, il en calcule, d'abord, la distance euclidienne de la station de base, et selon cette distance, il s'accroche à un niveau. Les figures 4.5 et 4.6 montrent une requête de diffusion d'appartenance et un accusé de réception des nœuds de niveau supérieur.

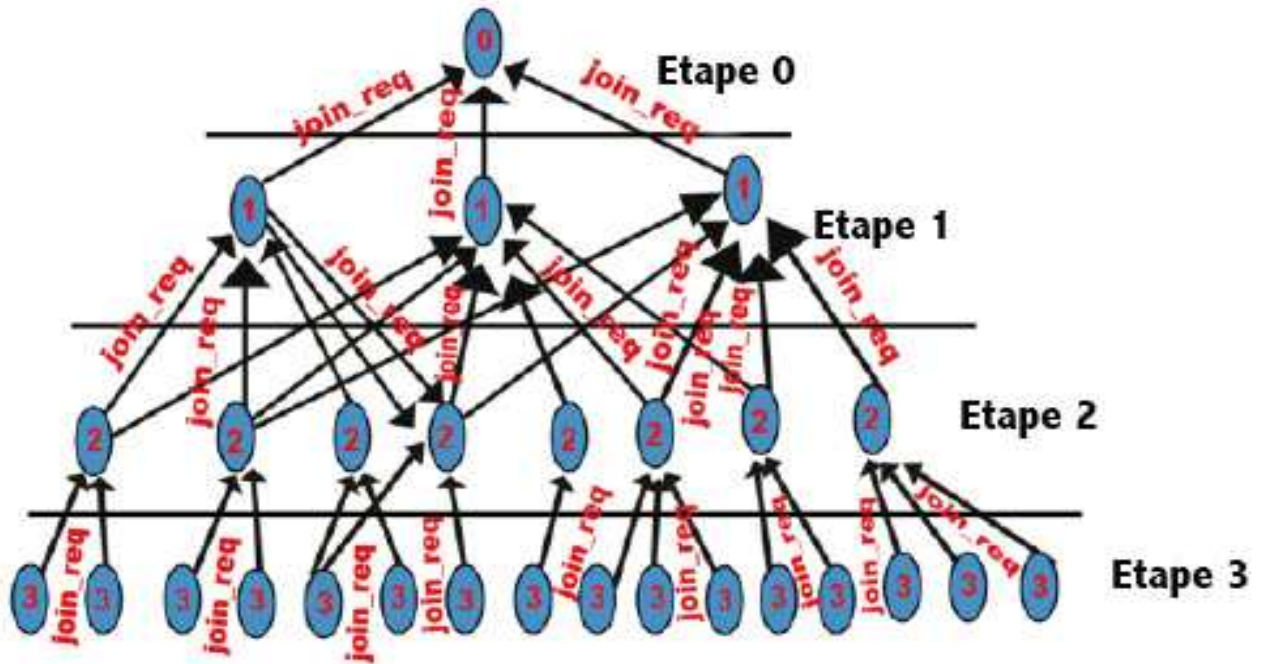


FIGURE 4.5: REQUETE D'APPARTENANCE [MRITYUNJAY ET ALLIES, 2010]

Dans l'**étape 2**, après avoir assigné un niveau, chaque nœud diffuse un paquet de requêtes de connexion comme le montre la figure 4.6 qui contient l'identité et le niveau du nœud.

Dans l'**étape 3**, lorsqu'un nœud s'aperçoit d'une requête de « rejoindre un niveau », il enquête au préalable, au niveau de ses nœuds parents à propos de cette requête.

Si l'enquête au niveau des nœuds parents est nulle, le nœud vérifie son degré. Après vérification si le degré du nœud est égal au degré de contrainte, le nœud répond, positivement, par un accusé de réception (join ack) figure 4.6.

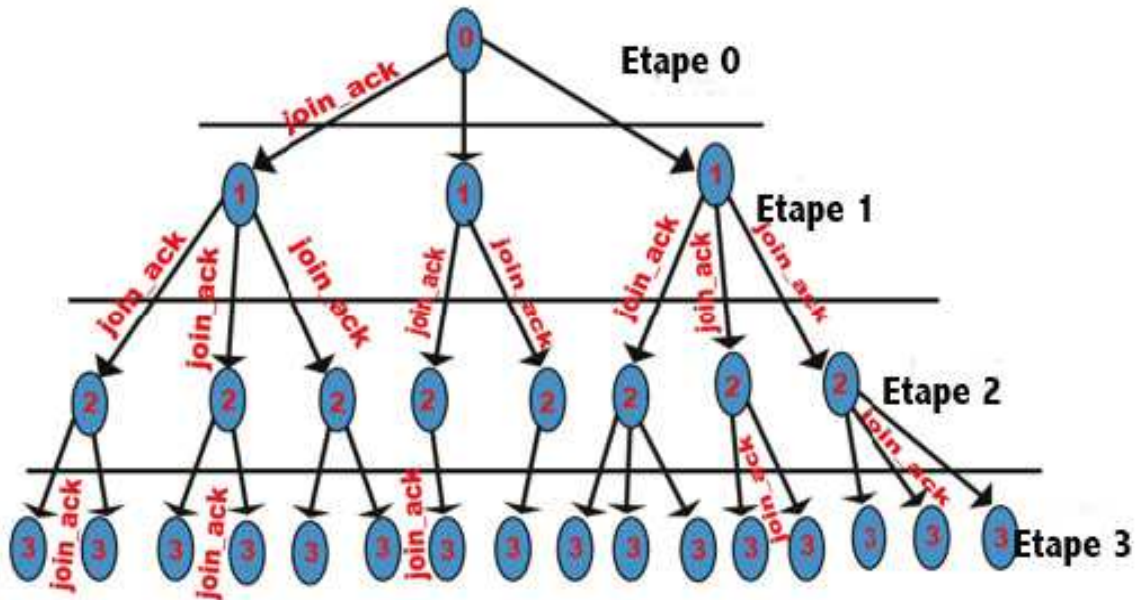


FIGURE 4.6 : REJOINDRE UN NIVEAU SUPERIEUR [MRITYUNJAY ET ALLIES, 2010]

Dans l'**étape 4**, le nœud requérant rejoint le nœud dont il a reçu, en premier, l'accusé de réception et devient comme un nœud enfant à ce dernier. Le nœud parent ajoute ce nœud à la liste de ses nœuds enfants et accroît le compteur degré du nœud de 1.

Dans l'**étape 5**, l'étape 2-4 sont répétées jusqu'à ce que l'arbre entier soit formé.

La figure 4.7 montre le nœud enfant envoyant des données à ses nœuds parents.

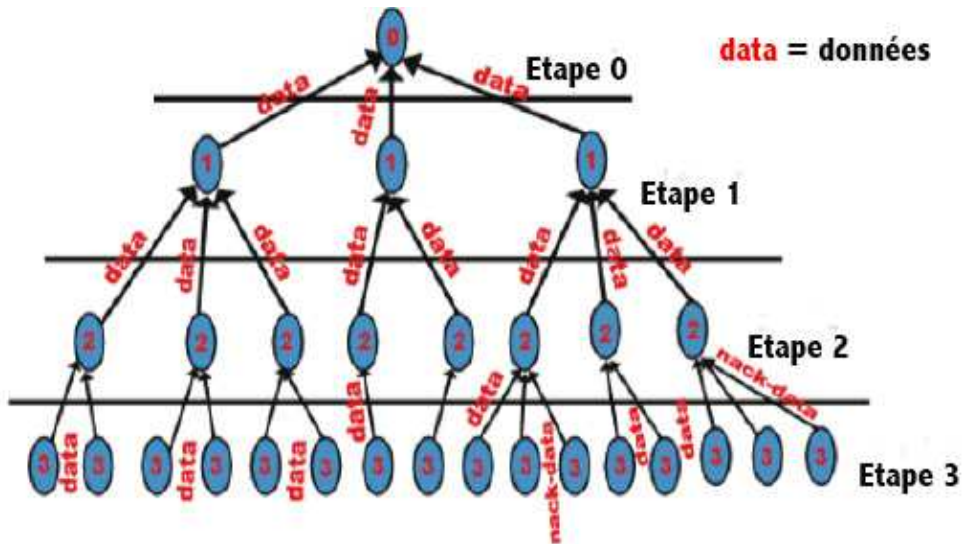


FIGURE 4.7: DONNEES TRANSMISES DU NŒUD ENFANT AU NŒUD PARENT
[MRITYUNJAY ET ALLIES, 2010]

A propos de la phase de la collecte des données et de la transmission des données à l'**étape 6**, après la phase de la formation de l'arbre, chaque nœud envoie la liste de ses enfants au nœud père.

Selon la liste des enfants, le nœud père envoie un programme TDMA à ses nœuds enfants. Dans son programme, le nœud enfant peut envoyer ses données au nœud père.

A l'**étape 7**, si le nœud enfant obtient les données, alors il les fait suivre à son nœud parent dans son time slot (DTMA) ; autrement, il envoie un « ack » data à son nœud parent. L'identité de l'approche CSMA/CA utilisé par le nœud pour envoyer les données figure 4.7.

A l'**étape 8**, le nœud parent agrège ses données avec les données de ses nœuds enfants et les envoie à son nœud parent. Finalement, le nœud proche de la station de base envoie les données collectées à la station de base. La figure 4.8 montre le mouvement des nœuds.

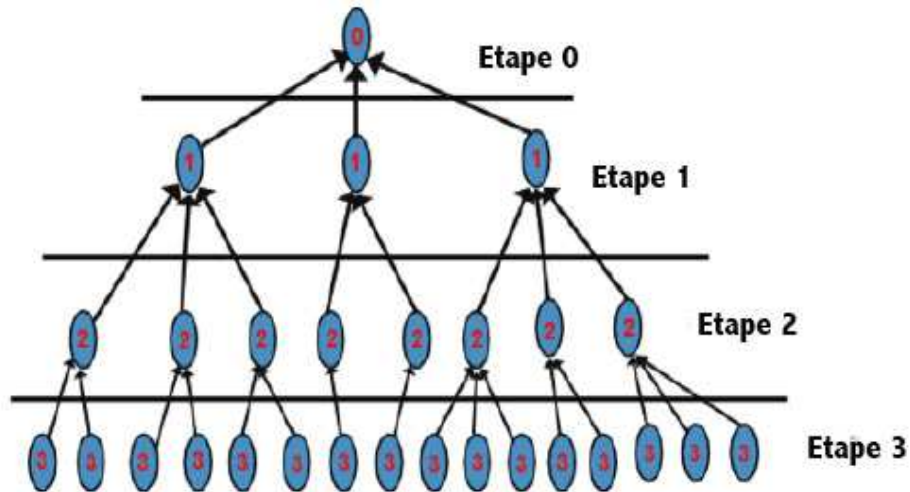


FIGURE 4.8: AGREGATION DES DONNEES DES NŒUDS [MRITYUNJAY ET ALLIES, 2010]

Selon la phase de purification, elle tient plusieurs situations telles que l'échec ou le mouvement du nœud parent ou du nœud enfant comme présenté en figure 4.6 - 4.7 et le niveau d'énergie du nœud.

A l'**étape 9**, lorsqu'un nœud se déplace, il change sa position. Il y a deux possibilités concernant le mouvement du nœud figure 4.9. La première, le nœud peut faire un mouvement dans le même niveau.

La deuxième possibilité, le nœud peut faire un mouvement vers un niveau au-dessus ou en dessous de lui. Lorsque la position du nœud doit changer, il se localise lui-même au moyen de l'algorithme de localisation figure 4.9.

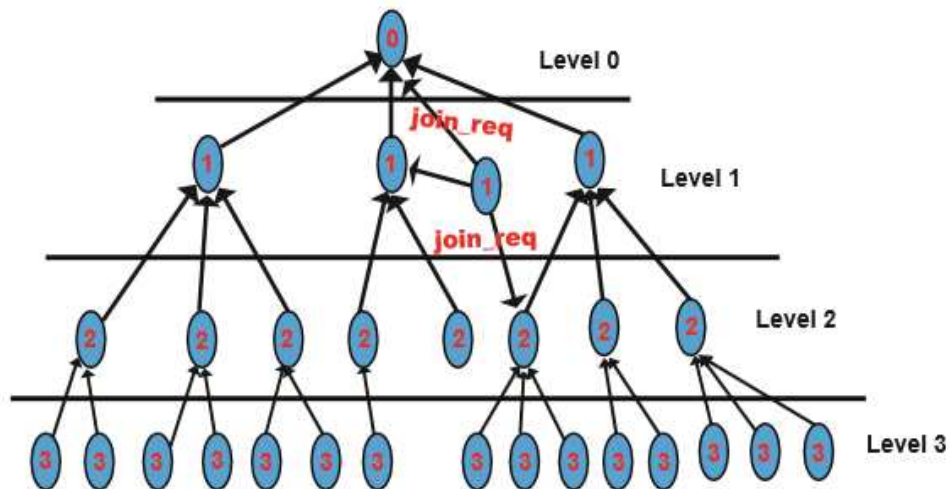


FIGURE 4.9: DIFFUSION DE REQUETE D'UN NŒUD POUR REJOINDRE UN NIVEAU
[MRITYUNJAY ET ALLIES, 2010]

Après avoir calculé sa position, le nœud calcule sa distance par rapport à la station de base et celui de son niveau.

A l'étape 10, si le niveau du nœud ne change pas, alors le nœud vérifie s'il est de la lignée de son père ou pas. S'il y est, alors il doit rejoindre l'arbre. Sinon, le nœud change de position en fonction de sa distance par rapport à la station de base et diffuse une requête de « rejoindre » figure 10. Il s'ajoute à la liste de son nœud père dont il obtiendra « ok join » comme accusé de réception. Alors il se retire de son ancien niveau. Cela crée la formation d'un nouvel arbre figure 10.

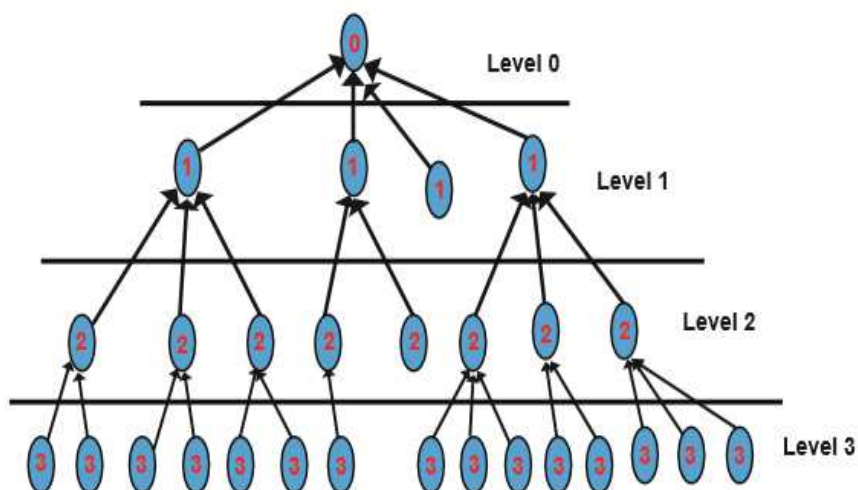


Figure 4.10: Nouvelle formation de l'arborescence [Mrityunjay et alliés, 2010]

A l'**étape 11**, il s'agit du traitement de l'invalidation du nœud. L'invalidation du nœud enfant : lorsque la transmission des données a lieu, si le nœud parent ne reçoit aucune réponse de son nœud enfant, il ajoute ce nœud à la liste des nœuds invalides et attend le time slot suivant. Dans le cas échéant, le nœud ne transmettant pas de réponse et est considéré comme un nœud invalide. Il est simplement retiré de la liste des nœuds enfants par le nœud parent figure 4.11.

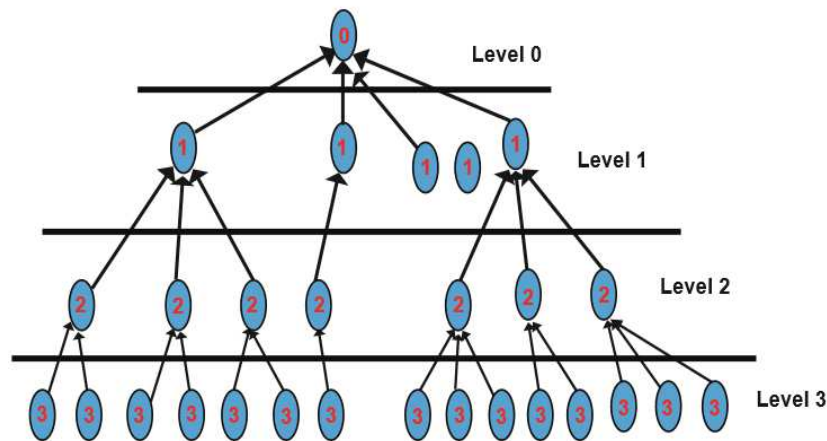


FIGURE 4.11: INVALIDATION D'UN NŒUD ENFANT [MRITYUNJAY SINGH ET ALLIES, 2010]

Si un nœud parent transmet des messages et qu'il ne reçoit aucun retour pendant un certain temps (approximativement 2 tours, celui-ci est éliminé de la liste des nœuds parents. Il est obligé de formuler une requête à la station de base pour connaître son nouveau statut.

A l'**étape 12**, il s'agit du traitement de la contrainte d'énergie.

Il y a deux valeurs possibles du niveau d'énergie des nœuds :

- Un niveau d'énergie supérieur à la moitié du niveau de la batterie initiale.
- Un niveau d'énergie bas que la moitié du niveau de la batterie initiale.

Si le niveau d'énergie du nœud est bas que la moitié de celle de la batterie, il fait un mouvement vers le niveau bas et accroît le compteur de ce niveau de 1. Dans le

contraire, où son niveau est supérieur alors, il monte d'un niveau au-dessus et décroît le compteur de son ancien niveau d'un.

IV.5 Résultat et analyse

Selon les équations (4.1) et (4.2) du protocole de routage F-AODVjr, nous avons pu créer un nouveau modèle pour trouver un meilleur chemin (la plus distance courte) pour transmettre les données rapidement.

Notre nouvelle approche consiste à choisir un nœud approprié (le plus proche) en calculant la distance entre le coordinateur et le nœud et à modifier la topologie du réseau et la communication dans la pile protocolaire ZigBee.

Les figures montrent la différence entre les vieilles architectures figure 4.12 et 4.13 provenant de l'arbre et du réseau, et les nouvelles conceptions que nous en proposons dans les figures 4.14 et 4.15 avec une nouvelle méthode de communication de nœud à nœud et de nœud à nœud parent.

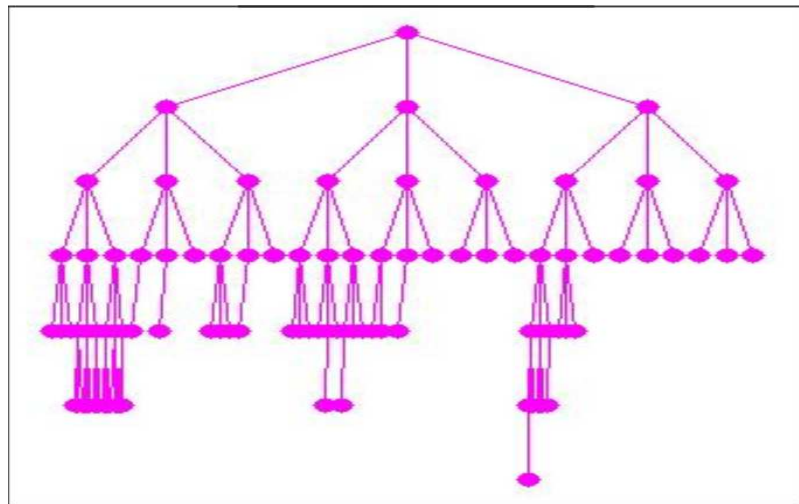


FIGURE 4.12 : TOPOLOGIE ARBORESCENTE

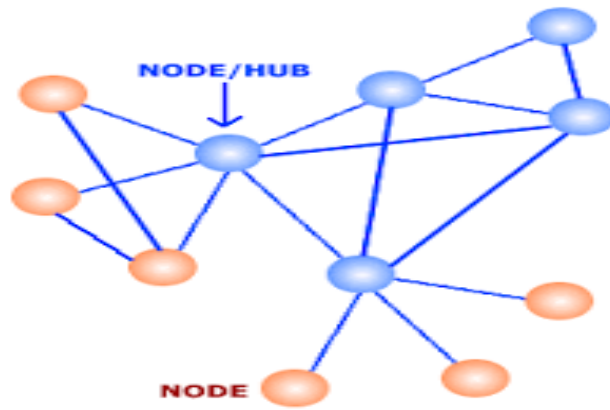


FIGURE 4.13 : TOPOLOGIE MAILLEE

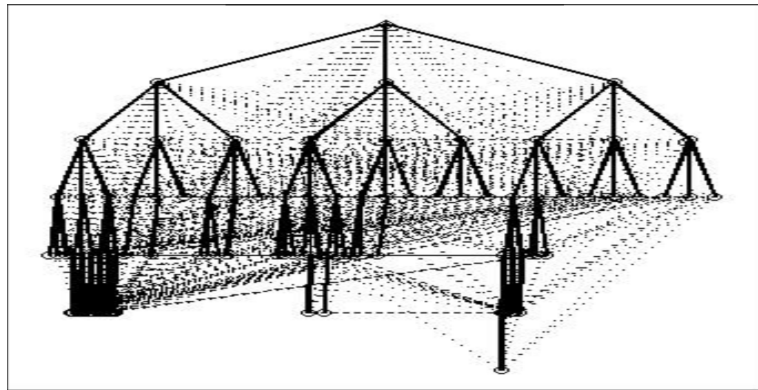


FIGURE 4.14 : NOUVELLE TOPOLOGIE ARBORESCENTE

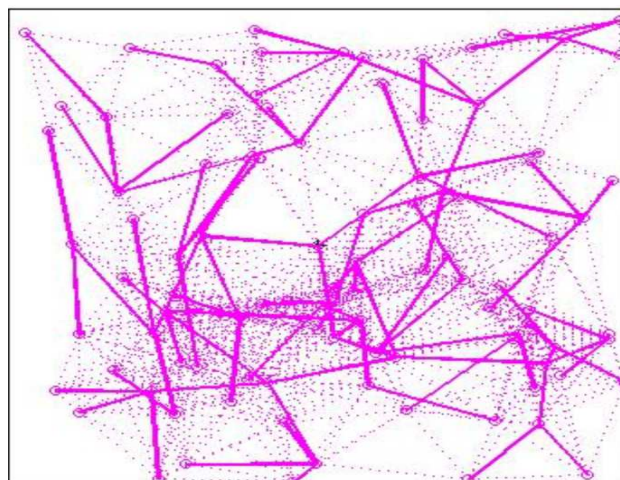


FIGURE 4.15 : NOUVELLE TOPOLOGIE MAILLEE

Nous calculons la distance (la plus courte distance) entre les nœuds voisins en tenant compte leurs énergies, et en fonction de la distance maximum que ces nœuds peuvent atteindre.

Dans les graphiques figures 4.16 et 4.17, nous pouvons voir les résultats.

Analyse

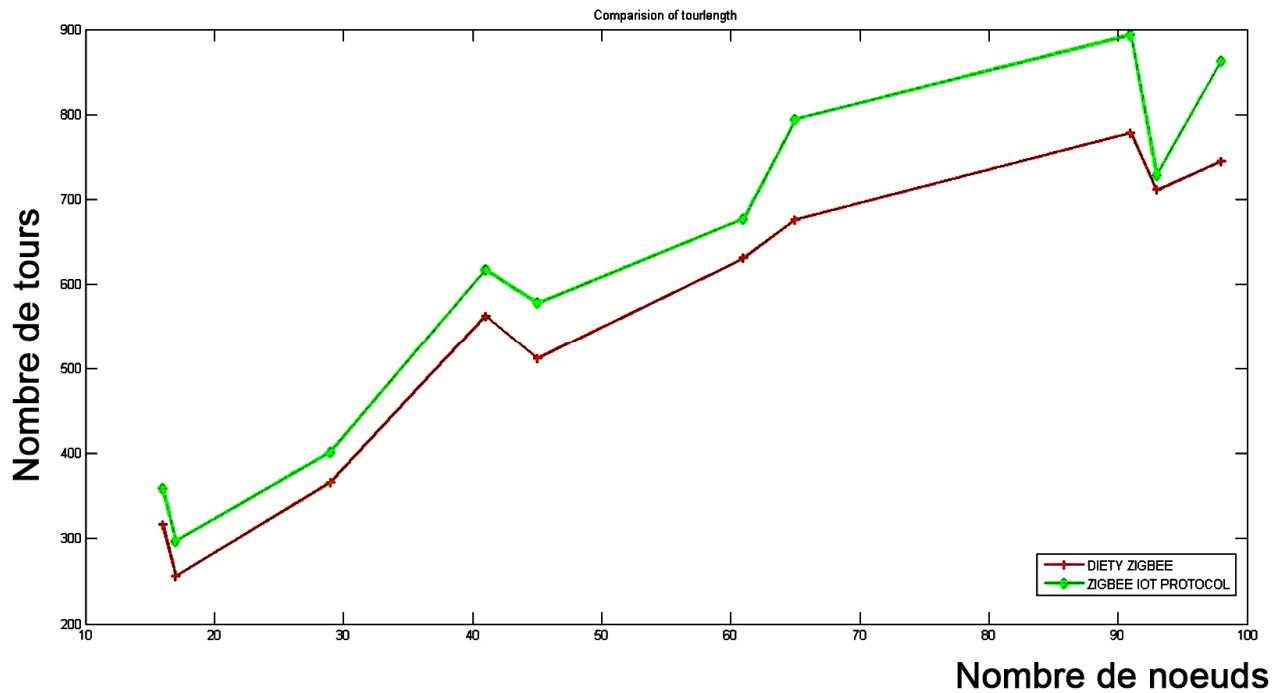


FIGURE 4.16: COMPARAISON NOMBRE DE TOURS ENTRE AODV/ZIGBEE DIETY ET AODV/ZIGBEE IOT PROTOCOLE

Nous présentons sur la figure 4.16, l'évolution de la distance parcourue par tour du nœud source au nœud connecté pour notre protocole que nous appellerons AODV/ZIGBEE Diety pour simplifier notre approche (en rouge) et pour le protocole AODV/ ZIGBEE initial en vert.

Nous observons un même sens de variation des deux courbes. Dès les premiers tours, il y a une légère diminution de la longueur de la distance, et après celle-ci subit une forte croissance pour les deux protocoles. Cependant, la courbe en rouge, qui présente le résultat du protocole AODV/ZIGBEE Diety proposé, reste toujours en dessous de celle en vert du protocole AODV/ZIGBEE initial.

La différence de distance par tour entre la courbe en vert et la courbe en rouge est toujours supérieure à 40 mètres. Ainsi, la distance parcourue dans le cas du protocole proposé est inférieure à celle parcourue dans le cas du protocole initial (en vert). Cela permet une durée de vie du réseau du protocole proposé plus élevée que celle de l'ancien protocole.

Notons V_{di} la distance parcourue pour connecter le i -^{ème} nœud au réseau en utilisant le protocole AODV/ZIGBEE initial dont la représentation est en vert.

Notons R_{di} la distance parcourue pour connecter le i -^{ème} nœud en utilisant notre protocole proposé dont la représentation est en rouge.

Examinons l'avantage du protocole proposé en fonction de la distance parcourue sur plusieurs intervalles, nous avons :

- ❖ Dans le premier intervalle [10 nœuds - 20 nœuds], $V_{d1} = 360\text{m}$ et $R_{d1} = 320\text{m}$ soit un avantage de 40m, notre méthode permet de parcourir moins de distance pour une même quantité d'informations à transmettre avec le même nombre de nœuds ;
- ❖ Dans le second intervalle [20 nœuds - 30 nœuds], $V_{d2} = 300\text{m}$ et $R_{d2} = 260\text{m}$ soit un avantage de 40m. Nous avons un gain réduit encore en distance ;
- ❖ Dans le troisième intervalle [30 nœuds - 40 nœuds], $V_{d3} = 400\text{ m}$ et $R_{d3} = 365$ soit un avantage de 35m. La distance est réduite de 5m, mais l'écart de gain en distance est énorme ;
- ❖ Dans le quatrième intervalle [40 nœuds – 50 nœuds], $V_{d4} = 620\text{m}$ et $R_{d4} = 570\text{m}$, soit un avantage de 60 m. Pour une même quantité de nœuds, l'écart de distance est passé au double que le précédent ;
- ❖ Dans le cinquième intervalle [50 nœuds – 60 nœuds], $V_{d5} = 580\text{m}$ et $R_{d5} = 515\text{m}$ soit un avantage de 65m. Identique pour le gain en distance, un écart, pratiquement, au double qu'à partir de celui du troisième intervalle.
- ❖ Dans le sixième intervalle [60 nœuds – 70 nœuds], $V_{d6} = 680\text{m}$ et $R_{d6} = 640\text{m}$, soit un avantage de 40m. L'écart est réduit, pratiquement, de moitié, mais reste toujours élevé ;
- ❖ Dans le septième intervalle [70 nœuds – 80 nœuds], $V_{d7} = 795\text{m}$ et $R_{d7} = 675\text{m}$, soit un avantage de 120m. Le gain en distance très énorme est passé au triple ;

- ❖ Dans le huitième intervalle [80 nœuds – 90 nœuds], $Vd8 = 895m$ et $Rd5 = 780m$ soit un avantage de 115m. Le gain en écart reste encore énorme.
- ❖ Dans le neuvième intervalle [90 nœuds – 93 nœuds], $Vd9 = 730 m$ et $Rd9 = 710 m$ soit un avantage de 20 m. L'écart chute, considérablement, mais reste à une vingtaine de mètres ;
- ❖ Dans le dixième intervalle [93 nœuds – 100 nœuds], $Vd10 = 870 m$ et $Rd10 = 740 m$ soit un avantage de 30 m. Dans ce dernier intervalle, l'écart de distance existe encore.
- ❖ Globalement, nous constatons que pour la liaison d'un nouveau nœud au réseau, la distance parcourue en utilisant notre protocole est toujours inférieure à celle parcourue lorsqu'on utilise l'ancien protocole. Le gain en distance est toujours supérieur à 20 m et peut augmenter jusqu'à 120 m. Notre méthode permet de parcourir moins de distance pour un même nombre de nœuds dans un même périmètre.

Les résultats de la figure 4.16 montre le protocole AODV/ZigBee DIETY fournit une amélioration allant de 2% à 15% par rapport au protocole AODV/ZigBee classique. Ce gain en distance est obtenu grâce à l'emprunt du plus court chemin utilisé par le protocole AODV/ZigBee DIETY.

Cette technique permet une amélioration moyenne de 10.6%.

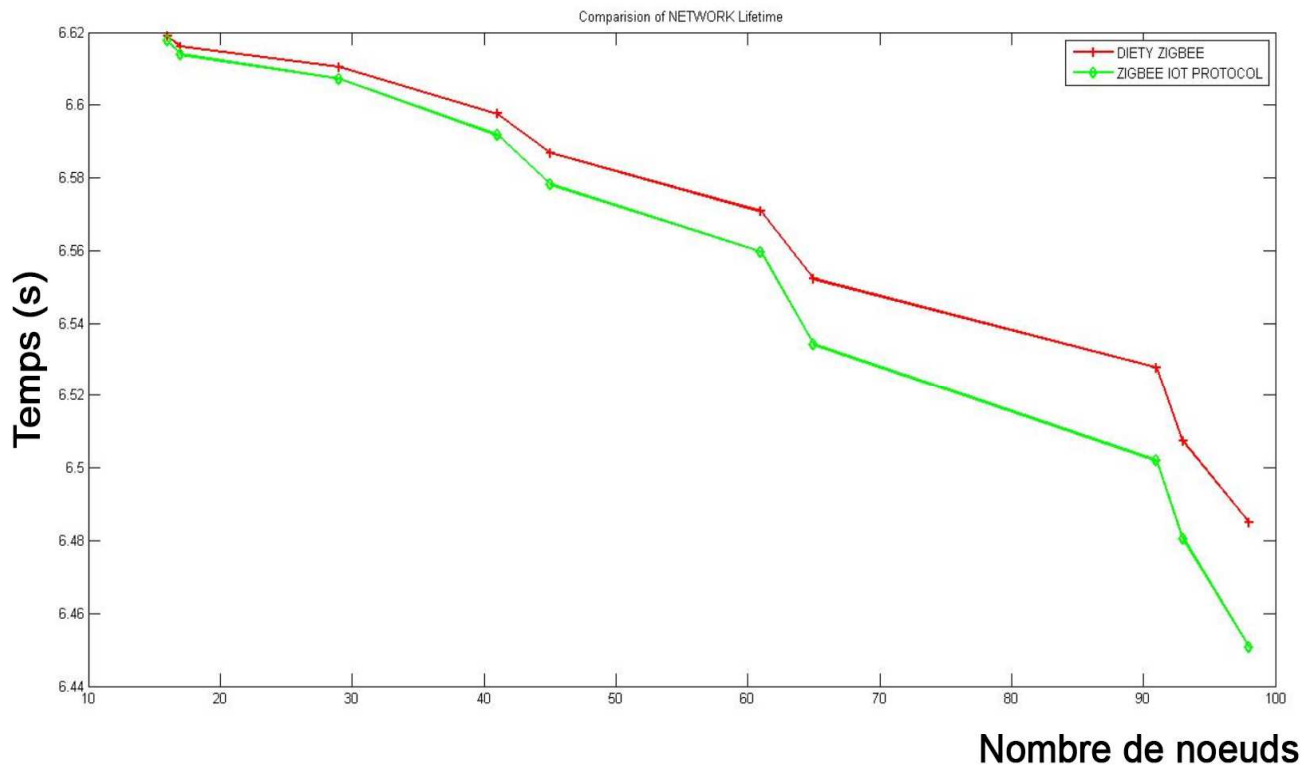


FIGURE 4.17: COMPARAISON DUREE DE VIE AODV/ZIGBEE DIETY ET AODV/ZIGBEE IOT PROTOCOLE

Nous proposons à la figure 4.17, une comparaison de la durée de vie des deux protocoles AODV/ZigBee Diety et AODV/ZigBee protocole.

Lorsque nous parcourons les deux courbes sur l'ensemble, nous nous rendons compte que la courbe du protocole AODV/ZigBee Diety est toujours au-dessus de celle d'AODV/ZigBee protocole. Toutes choses qui prouvent, en effet, que notre méthode a une durée de vie un peu plus longue que la précédente. Lorsque nous procédons par un découpage en intervalles, nous pouvons voir qu'avec notre méthode, nous perdons moins de nœuds capteurs.

- Dans le premier intervalle de temps [6.44s – 6.48s], nous voyons que l'ancien protocole perd des nœuds, environ 6 nœuds. Tandis qu'avec notre protocole, aucun nœud perdu.
- Dans le second intervalle [6.48s – 6.5s], l'ancien protocole perd douze (12) nœuds, alors que le nôtre perd des nœuds, environ 4.

- Dans le troisième intervalle [6.5s – 6.52], nous constatons une perte élevée au niveau de l'ancien protocole, environ 15 nœuds, tandis qu'avec notre méthode, nous perdons, seulement, trois (3) nœuds.
- Dans le quatrième intervalle [6.52s – 6.54s], le nombre de nœuds perdus est un peu élevé de part et d'autre. Environ 12 nœuds dans l'ancienne méthode et dans la nôtre, 13 nœuds. Cela annonce que nous sommes à mi-parcours dans les deux courbes.
- Au niveau du cinquième intervalle [6.54s – 6.56s], nous avons moins de perte de nœuds dans l'ensemble. En effet, l'ancienne méthode perd 3 nœuds et la nôtre perd 2 nœuds.
- S'agissant du sixième intervalle [6.56s – 6.58s], nous remarquons une perte paritaire entre les deux méthodes. Une perte d'environ 16 nœuds de part et d'autre.
- Au septième intervalle [6.58s – 6.6s], nous observons une perte égalitaire, également, environ 4 nœuds de part et d'autre. Il faut noter que, par moments, les deux méthodes utilisent les mêmes voies et les mêmes distances pour communiquer.
- Concernant le dernier intervalle [6.6s – 6.62s], nous remarquons une perte élevée au niveau de notre méthode environ 25 nœuds, tandis que l'ancienne perd 18 nœuds. Cela démontre que nous sommes, pratiquement, en fin d'essai, il ne reste plus assez de nœuds pour transmettre.

Globalement, nous remarquons, après avoir calculé le nombre de nœuds perdus, qu'avec notre méthode, nous perdons moins de nœuds ; au final environ 67 nœuds sur 100 nœuds et l'ancienne méthode perdent un peu plus environ 76 nœuds sur 100 nœuds. Soit une différence de 11 nœuds entre nos deux méthodes.

En termes de durée de vie du réseau, le protocole AODV/ZigBee DIETY fournit une amélioration allant de 0.1% à 0.55% par rapport au protocole AODV/ZigBee classique. La moyenne d'amélioration est de 0.21%. Cette amélioration de la durée de vie du réseau est due au fait le protocole AODV/ZigBee DIETY utilise le plus court

chemin. Cela permet aux autres nœuds de se reposer et de mieux conserver leur énergie quand ils ne sont pas sollicités, ce qui prolonge la durée de vie du réseau.

En somme, notre méthode permet d'avoir une durée de vie un peu plus longue que l'ancienne méthode.

Conclusion

Notre nouvelle approche AODV/ZigBee DIETY permet d'améliorer le protocole AODV/ZigBee classique. Elle optimise le calcul de recherche de la plus courte distance pour transmettre les données envoyées. Cette méthode allège le temps d'accusé de réception ou de confirmation des données en parcourant un plus court chemin. Ce qui réduit également, le temps d'établissement d'une liaison pour la transmission des données et permet aux différents nœuds de moins dépenser en énergie pour leur communication. Car lorsque certains nœuds ne sont pas sollicités, ils passent plus de temps en mode veille et minimise leur dépense d'énergie. Cela rallonge la durée de vie du réseau.

D'autres améliorations peuvent encore être réalisées avec la pile protocolaire ZigBee à travers les techniques d'accès et de contrôle au niveau de la couche MAC.

CONCLUSION GENERALE

Les objets connectés sont de plus en plus, sollicités par les entreprises comme par les particuliers. Cet engouement fait que d'ici l'an 2020, nous aurons plus de 20 milliards d'objets connectés dans le monde.

Le réseau de capteurs sans-fil utilisé, dans la plupart des cas, pour la transmission des données vers les utilisateurs est de plus exploité.

En cas d'alerte ou d'apparition de phénomènes, les nœuds capteurs déployés dans la zone en charge de l'événement transmettent, sans cesse les données à l'utilisateur via la station de base. Malheureusement, il peut arriver qu'un nœud capteur puisse être défaillant pour l'acheminement des données par manque d'énergie (batterie déchargée ou à plat) ou encore un problème d'acheminement des données dû à une mauvaise communication entre les nœuds capteurs.

De nombreuses recherches ont été effectuées avec des résultats satisfaisants dans l'ensemble pour palier à ces problèmes. Mais il y avait encore des possibilités d'optimisation lorsque, nous avons passé en revue certains travaux.

Ainsi pour notre contribution, nous nous sommes focalisé sur l'énergie et la communication au sein du réseau de capteurs sans-fil à savoir :

- La minimisation de dépenses énergétiques au sein du réseau de capteurs sans-fil ;
- L'amélioration du protocole AODV/ZigBee, un protocole de communication utilisé au sein du réseau de capteur sans-fil.

Nos contributions se situent à deux niveaux de la recherche:

La première contribution concerne la minimisation de dépenses énergétiques au sein du réseau de capteurs sans-fil. Pour parvenir à cette minimisation, nous sommes parti de l'existant, avons analysé des méthodes et amélioré l'une des techniques de conservation d'énergie au sein du réseau de capteurs sans-fil.

L'ancienne technique qui est l'amélioration du protocole LEACH, consiste à envoyer les données par un seul Cluster Head par Cluster à la station de base, jusqu'à un certain seuil, où son énergie ne lui permet plus de transmettre. Nous avons pensé autrement à la technique de transmission.

Notre solution propose en plus des Clusters Head par Cluster, des Vices-Clusters Head vont les aider dans la transmission des données. Ils sont solidaires aux Clusters Head et cela évite que les Clusters Head épuisent vite leur énergie. Les tests ont donné de très bons résultats avec de bonnes performances, augmentant ainsi la durée de vie du réseau de capteurs sans-fil.

La seconde contribution concerne l'amélioration du protocole AODV/ ZigBee très utilisé au sein du réseau de capteurs sans fil pour la communication.

La pile protocolaire ZigBee regroupe plusieurs protocoles en son sein qui lui permettent de faire communiquer les nœuds entre eux au sein d'un réseau de capteurs sans-fil.

Notre apport dans cette seconde contribution est d'améliorer l'un de ses protocoles, le protocole AODV. A travers notre méthode, l'acheminement des données vers la station de base se fait avec un plus court chemin qui permet un meilleur rendement. Cela permet aux nœuds de passer plus de temps en mode veille et prolonger sa durée de vie et celle du réseau.

Nos travaux, nous offrent d'autres perspectives à explorer, à savoir :

- ❖ Une technique de recharge des batteries des capteurs sans fil en temps réel pour éviter la perte des données à travers les énergies renouvelables.
- ❖ Améliorer encore notre technique avec d'autres combinaisons ou possibilités pour une meilleure minimisation de dépenses énergétiques ;
- ❖ La combinaison de l'énergie solaire avec de nouvelles techniques de conservation d'énergie ;
- ❖ Créer différents niveaux de sécurité des objets connectés et pour le réseau de capteurs sans-fil ;
- ❖ La gestion des données avec l'affluence d'objets connectés mobiles / fixes.

LISTE DES PUBLICATIONS

Diety, Guy. , Ali, K., Asseu, O., Zehero, B. and Hamouda, S. (2017) “**Energy Optimization in Wireless Sensor Network**”. *Engineering*, **9**, 880-889. <http://www.scirp.org/journal/eng> ISSN Online: 1947-394X ISSN Print: 1947-3931 doi: [10.4236/eng.2017.910053](https://doi.org/10.4236/eng.2017.910053).

Diety Guy L., B. Bolou Zehero, K. Eugène Ali, Olivier Asseu, and Soumaya Hamouda
“ON THE IMPROVEMENT OF ZigBee PROTOCOL INSIDE WIRELESS SENSOR NETWORK”

Far East Journal of Electronics and Communications © 2018 Pushpa Publishing House, <http://www.pphmj.com><http://dx.doi.org/10.17654/EC018060945> Volume 18, Number 6, 2018, Pages 945-965 ISSN: 0973-7006.

BIBLIOGRAPHIE

[Acharna, 2011] R. Acharna and Dr L. G Malik,” ZigBee: The emerging technology in building automation”, International Journal of Computer Science and Engineering (IJCSE), vol. 3, No 4, April 2011, P 149-148

[A. Dunkels, 2004] A. Dunkels, B. Gronvall, T. Voigt “Contiki-A: Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors”, in Proceedings of the 29th annual IEEE International Conference on Local Computer Network, November 2004, pp. 455-462.

[A. Dunkels, 2007] A. Dunkels, F. Österlind, Z. He “An adaptive communication architecture for wireless sensor networks”, in Proceedings of the 5th International conference on Embedded networked sensor systems (SenSys’ 07), New York, NK, USA, 2007, pp. 335-349. 123

[A. Dunkels, 2003] A. Dunkels, “Full TCP/IP for 8 bit architecture”, in proceedings of First ACM / Usenix International conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys’03), San Francisco, USA, 2003, pp. 85-98.

[A. Giridhar, 2005] A. Giridhar and P. Kumar, “Maximizing the functional lifetime of sensor networks”, in proceedings of the 4th International Symposium on Information Proceeding in Sensor Network (IPSN), 2005, pp. 13-19.

[Al-Karaki, 2004] Al-karaki, Jamal N. and Ahmed E. Kamal. “Routing techniques in wireless sensor networks: a survey”, IEEE 11.6 (2004): 6-28

[Amjad, 2011] Amjad Gawanmeh, “Embedding and verification of ZigBee protocol stack in Event-B”, *Procedia Computer Science* 5/2011/736-741

[Asma Ben Hadj, 2015] Réseau de capteurs sans fil comportement pour l'aide au maintien à domicile par la surveillance en habitat intelligent, Université de Toulouse le Mirail – Toulouse II, 2015.

[C-C. Han, 2005] C-C. Han, R. Kumar, R. Shea, E. Kolhler “A Dynamic Operating System for Sensor Nodes”, in *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys'05)*, New York, NY, USA, 2005, pp.163-176.

[C. F. Chiasserini, 2002] Carla-Fabiana Chiasserini, Imrich Chlamtac, Paolo Monti, Antonio Nucci, “Energy efficient design of wireless ad hoc networks”. In *Proceedings of the 2nd International IFIP-TC6 Networking Conference on Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; and Mobile and Wireless Communications (NETWORKING'02)*, pages 376-386, London, UK, 2002. Springer-Verlag.

[Chen, 2015] Chen C,” ZigBee smart energy product, Colorado: webcom communication corp”, August 31, 2015: P 15-16/
http://www.nxtbook.com/nxtbooks/webcom/zigbee_rg2015.

[Dai, 2014] Dai Chengbin,” Research of ZigBee low energy consumption and high reliability” Guanding university of technology, 2014

[D. Gay, 2003] D. Gay, P. Levis, D. Culler, E. Brewer “nesC 1.1 Language Reference Manual”, May 2003, pp. 1-27.

[Di Tian, 2002] Di Tian and Nicolas D. Georganas. “A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks”. In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA’02), pages 32-41, New York, NY, USA, 2002. ACM.

[Ghiasi S., 2002] S. Ghiasi, A. Srivastava, X. Yang, M. Sarrafzadeh “Optimal Energy Aware Clustering in Sensor network”, SENSORS Journal, Vol. 2, No. 7, 2002, pp. 258-269

[Heinzelman, 2000] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balkrishnan, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks”, in proceeding of 33rd Hawaii International Conference on System Science, Vol. 2, Jan. 2000, pp. 10

[H. Karl, 2005] H. Karl and A. Willig. “Protocols and architectures for wireless sensor networks”. In Wiley, 2005.

[Ian F, 2002 A] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “A Survey on Sensor Networks”. IEEE Communications Magazine, 40(8):102-114, August 2002. 5, 7

[Ian F, 2002 B] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey”. Computer Networks, 38(4):393-422, 2002.

[Ian F, 2007] Ian F. I.F. Akyildiz, T. Melodia, K.R. Chowdhury, “A survey on wireless multimedia sensor networks”. Computer Networks, 51(4):921-960, 2007.

[IEEE-SA, 2016] IEEE, IEEE-SA Standards Board, IEEE 802.15.4-2006 standard for WPAN, <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.2.15.4-2006.html>

[Jaap C, 2000] Jaap C. Haartsen. "The Bluetooth radio system. IEEE Personal Communications, 7(1): 28-36, February 2000.

[Jae-Hwan, 2000] Jae-Hwan Chang, L. Tassiulas, "Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks". In Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'00), volume 1, pages 22-31, Tel-Aviv, Israel, 2000.

[Kalai, 2011] Kalai Vani T, Allirani A, Priya, " A survey on ZigBee based wireless sensor networks in agriculture", 3rd international conference on trendz in information science & computing (TISC 2011), December 2011, <https://doi.org/10.1109/tisc.2011.6169090>

[K. Holger, 2005] Holger Karl, A. Willig, "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks". Wiley, 2005.

[Liu, 2012] Liu Chengyin, Liu Wei, He Kai, "On-line comprehensive monitoring application for power transmission line based on GPRS and ZigBee technology", Journal of Heilongjiang institute of science & technology 2012: 22:4: P 437-441

[Long, 2010] Long Cheng, Das, S.K, Jiannong Cao, Canfeng Chen, Jian Ma, "Distributed Minimum Transmission Multicast Routing Protocol for Wireless Sensor Networks" IEEE 39th International Conference on Parallel Processing (ICPP), 2010, pp. 188-197.

[Mehra, 2015] Mehra, Pawan Singh, M. N. Doja and Bashir Alam "Energy efficient self organising load balanced clustering scheme for heterogeneous WSN" Energy Economics and environment (ICEEE), 2015 International conference on IEEE, 2015

[Manisha, 2016] Manisha and Nidhi Mittal “Deterministic Relay Node based Improved LEACH Protocol for Wireless Network: A Review” International Journal for Innovative Research in Science & Technology, Vol 3, Issue 01, 2016, ISSN: 2349-6010

[Manisha, 2014] Liu Xiaohua, Peng Yong, “Research on improved ZigBee mesh network routing algorithm”, Computer engineering 2014:40:8-96-100

[Manpreet, 2015] Manpreet, Jyoteesh M., “Simulation analysis of tree and mesh topologies in ZigBee network”, International Journal of Grid distribution computing, Vol. 8/ No 1/ 2015/P 81-82/ <https://doi.org/10.14257/iigdc.2015.8.1.08>

[Mamunur, 2015] Md. Mamunur Rashid and Rethwan Faiz. “ZigBee: Simulation and investigation of star and mesh topology by using different transmission bands”, the AIUB Journal of Science and Engineering (AJSE). Vol. 14/No 1/August 2015/P 115-121

[Mrityunjay, 2010] Mrityunjay Singh, M. Sethi, N. Lal, “A tree based routing protocol for mobile sensor network”, International Journal on computer science and engineering (IJCSE), Vol. 02, No 15, 2010, P 55-60

[M. Esseghir, 2005] M. Esseghir, N. Bouabdallah, “A Novel Approach for Improving Wireless Sensor Network Lifetime”, in IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005, pp. 2701-2706.

[Nahla, 2015] Nahla Abdulrahman H., Fuad Ali Y., “Performance evaluation of ZigBee routing protocol under using OPNET modular”, International Journal of Computer Applications (0975-8887), Vol. 117, No. 18 May 2015, P 25-31

[Naven, 2004] Naven Sastry and David Wagner, “Security considerations for IEEE 802.15.4 networks” In proceeding of the 3rd ACM workshop on wireless security, P 32-42 ACM 2004

[Nguyen, 2012] T Nguyen Thanh “Heuristic Energy-Efficient Routing Solutions to Extend the Lifetime of Wireless Ad-Hoc Sensor Networks” Springer, LNCS 7197, 2012, pp. 487-497

[Ochirkhand, 2010] Ochirkhand Erdene-Ochir, M. Minier, F. Valois, “Resilient Routing in Wireless Sensor Networks: Gradient-Based Routing in Focus” IEEE, Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM), July 2010, pp. 478-483.

[Pang, 2010] Pang Na, “Research of ZigBee mesh network for wireless sensors”, Jilin: Jilin university/2010

[P. Levis, 2006] P. Levis, “TinyOS Programming manual”, 27 October 2006.
[Online]:<http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/pdf/tinyos-programming.pdf>

[Rajevv, 2015] Rajevv Arya and S.C Sharma “Analysis and Optimization of energy of sensor node using ACO in wireless sensor networks” International Conference on Advanced Computing Technologies and Applications (ICACTA), 2015, pp. 681-686

[Ravi, 2014] Ravi Tomar “Qos issues in Wireless Sensor Networks An Energy Efficient Approach” LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014

[R. Verdone, 2008] R. Verdone, D. Dardari, G. Mazzini, A. Conti, “Wireless Sensor and Actuator Networks Technologies, Analysis and Design”, London, UK, Elsevier, 2008.

[Salim, 2014] Salim El Khediri, Nejah NASRI “A New Approach for Clustering in Wireless Sensor Networks Based on LEACH” 2014.

[Shantanu, 2017] Shantanu K. Nath, S. Aznabi, N.T. Islam, ” Investigation and performance analysis of some implemented features of the ZigBee protocol and IEEE MAC specification, American international university (AUIB), Bangladesh, <https://doi.org/10.3991/ijoe-vol.13/No1/2017>

[S. Bhatti, 2005] S. Bhatti, J. Carlson, H. Dai, J. Deng, J. Rose, A. Sheth, “MANTIS OS: An Embedded Multithreaded Operating System for Wireless Micro Sensor Platforms”, in Journal Mobile Networks and Applications, Special Issue on Wireless Sensor Networks, 2005, Vol.10, Issue 4, pp. 563-579.

[S. Soro, 2005] Stanislava Soro and Wandu B. Heinzelman. “Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering”. In Proceedings of 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS’05), Denver, Colorado, USA, April 2005.

[Thanh, 2012] Thanh Tung Nguyen, Van Duc Nguyen “Optimizing the operating time of wireless sensor network” EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking, 2012, doi:10.1186/1687-1499-2012-348

[Thoraya, 2014] Thoraya Obaid, H. Rashed, A. Abou-Elnour, “ZigBee technology and its application in wireless home automation system: A survey”, International Journal

[Venkatesh R, 2003] Venkatesh R. K. Obraczka, “Energy-efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks. In Proceedings of the 1st international conference on embedded networked Sensor Systems (SenSys’03), pages 181-192, New York, NY, USA, 2003. ACM.

[Vivek P., 2005] Vivek P. Mhatre, C. Rosenberg, D. Kofman, “A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint”. IEEE Transactions on Mobile Computing, 4(1): 4-15, January - February 2005.

[Wei Wang, 2005] Wei Wang, V. Srinivasan, K.C. Chua, “Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks”. In Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile Computing and networking (MobiCom’05), pages 270-283, New York, NY, USA, 2005. ACM.

[Wendi R., 2000] Wendi Rabiner Heinzelman, A. Chandrakasan, “Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks”. In Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS’00), volume2, pages 3005-3014, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.

[Wissan, 2014] Wissan Razouk, G.V. Crosby, A. Sekkaki, “new Security approach for ZigBee weakness” Procedia Computer Science 37/2014/376-381

[Y. Chen, 2005] Y. Chen and Q. Zhao, “On the Lifetime of Wireless Sensor Networks”, in IEEE Communication letters, Vol. 9, No. 11, November 2005, pp. 976-978.

[Zahoor, 2012] Zahoor A. Khan, Srinivas Sampalli “AZR-LEACH: An Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks” International Journal Communications, Networks and System sciences, 2012, pp. 785-795

[Zefeng, 2017] Zefeng Yi , H. Hou, X. He, Z. Lv, C. Wang, “ZigBee technology application in wireless communication mesh network of ice disaster”, Procedia Computer Science 52/2015/1206-1217

[Zhang, 2014] Zhang Ling C., “Monitoring system design of substation environments based on ZigBee technology”, Heilongjiang: Harbin university of science and technology, 2014

[Z. Hu, 2004] Z. Hu and B. Li, “On the fundamental capacity and lifetime limits of energy-constrained wireless sensor networks”, in Proceedings of 10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2004.

ANNEXES

ANNEXE A : Code principale du Nombre de nœuds Chefs, Sous-Chefs, Nombre de nœuds morts et vivants, nombre de paquets transmis à la station de base

DEAD_A: un tableau rmax x 1 du nombre de nœuds avancés morts / arrondi

DEAD_N: un tableau rmax x 1 du nombre de nœuds normaux morts / arrondi

CLUSTERHS: un tableau rmax x 1 nombre de têtes de groupe / arrondi

PACKETS_TO_BS: un tableau rmax x 1 nombre de paquets envoyés à la station de base / round

PACKETS_TO_CH: un tableau rmax x 1 contenant le nombre de paquets envoyés à ClusterHeads / round

first_dead: Représente le tour où le premier nœud est mort

%%
 %%%%%%%%%

Recherche du statut des nœuds

Si l'énergie est nulle alors le nœud est mort sinon le nœud est vivant

```

if (S2(i2).E>0)
nodes_status2=1;
end
if (S2(i2).E<0)
nodes_status2=0;
end
STATISTICS(i2).Status=nodes_status2;
Status2(i2)=nodes_status2;
ASTATISTICS2(r2+1).Live=alive2;
Live2(r2+1)=alive2;
Live_n2(r2+1)=alive_n2;
Live_i2(r2+1)=alive_i2;
Live_a2(r2+1)=alive_a2;
end
  
```

Recherche du dernier nœud mort ou vivant

```

for i2=1:1:n
if (alive2==1 && S2(i2).E>0)
  
```

```

if (S2(i2).ENERGY==1||S2(i2).ENERGY==0||S2(i2).ENERGY==0.5)
% plot(S2(i2).xd,S2(i2).yd,'green .')
last_dead2=r2;
Instability2=last_dead2-first_dead2;
flag_last_dead2=1;
end
end
end

```

```

countCHs2=0;
cluster2=1;
for ii2=1:1:n
if(S2(ii2).E>0)
temp_rand2=rand;
if ( (S2(ii2).G)<=0)

```

Election of Cluster Heads

Chaque nœud k du domaine génère un nombre aléatoire $m(k)$ (noté dans le % %
% script temp_rand2).

Si $m(k)$ est plus petit ou égale $T(k)$ alors le nœud
% est éligible

```

if(temp_rand2<= (p/(1-p*mod(r2,round(1/p))))*(S2(ii2).E ))
countCHs2=countCHs2+1;
packets_TO_BS2=packets_TO_BS2+1;
PACKETS_TO_BS2(r2+1)=packets_TO_BS2;
S2(ii2).type='C';
S2(ii2).G=round(1/p)-1;
C2(cluster2).xd=S2(ii2).xd;
C2(cluster2).yd=S2(ii2).yd;
% plot(S2(i2).xd,S2(i2).yd,'k*');
distance2=sqrt( (S2(ii2).xd-(S2(n+1).xd) )^2 + (S2(ii2).yd-(S2(n+1).yd) )^2 );

```

```

C2(cluster2).distance=distance2;
C2(cluster2).id=S2(ii2).id;

```

```

X2(cluster2)=S2(ii2).xd;
Y2(cluster2)=S2(ii2).yd;

```

```

cluster2=cluster2+1;

```

```

distance2;

```

```

end
end
end
end

```

Vérification du nombre moyen de chefs de groupe

```

sum2=sum2+(cluster2-1);
count_ch2=count_ch2+1;
% count_object=zeros(1,r);
l2=100;
if count_ch2==10
Ave_CH2=(sum2*0.1)/(1+(m*a));
Throughput2=Ave_CH2*4;
STATISTICS(r2+1).ave_clustHd=Ave_CH2;
ave_ch2(r2+1)=Ave_CH2;
STATISTICS(r2+1).throughput=Throughput2;
Clust_throughput(r2+1)=Throughput2;
if Ave_CH2~=0
count_object(l2)=Ave_CH2 ;
end
Ave_CH2=0;
sum2=0;
count_ch2=0;
end
STATISTICS(r2+1).CLUSTERHEADS=cluster2-1;

CLUSTERHS2(r2+1)=cluster2-1;

```

Election de cluster Head associée (Sous CH) pour les nœuds normaux

```

for i2=1:1:n
if ( S2(i2).type=='N' && S2(i2).E>0 )
if(cluster2-1>=1)
% min_dis=sqrt( (S(i).xd-S(n+1).xd)^2 + (S(i).yd-S(n+1).yd)^2 );
min_dis2=9999;
min_dis_cluster2=1;
for c=1:1:cluster2-1

temp2=min(min_dis2,sqrt( (S2(i2).xd-C2(c).xd)^2 + (S2(i2).yd-C2(c).yd)^2 ));
if( temp2<min_dis2 )
min_dis2=temp2;
min_dis_cluster2=c;
end
end
end

```

Energie dissipée par le cluster Head

```

min_dis2;

```

```

if (min_dis2<=do)
S2(i2).E=S2(i2).E- ( ETX*(4000) + Efs*4000*( min_dis2 * min_dis2));
end

if (min_dis2>do)
% [diss,idd]=sort(diss,'ascend');
for i=1:1:c-1

temps2=(sqrt( (S2(i).xd-C2(c).xd)^2 + (S2(i).yd-C2(c).yd)^2 ) );
min_dis2=9999999;
if temps2 > do
for j=1:1:c-1

find_near_subcluster=min(min_dis2,sqrt((S2(i).xd-S2(j).xd)^2+(S2(i).yd-
S2(j).yd)^2));
if ( find_near_subcluster<min_dis2 )
min_dis2=find_near_subcluster;
end
end
S2(i).E = S2(i).E- ( ETX*(4000) + Efs*4000*( min_dis2 * min_dis2));
end

end
end

```

Energie dissipée

```

if(min_dis2>0)
S2(C2(min_dis_cluster2).id).E = S2(C2(min_dis_cluster2).id).E- ( (ERX +
EDA)*4000 );
PACKETS_TO_CH2(r2+1)=n-dead2-cluster2+1;
end
S2(i2).min_dis=min_dis2;
S2(i2).min_dis_cluster=min_dis_cluster2;
end
end
end

```

Election de cluster Head assurant la relève au prochain bond

```
countCHs2;
```

```

rcountCHs2=rcountCHs2+countCHs2;
for c=1:1:cluster2-1

temp2=sqrt( (S2(n+1).xd-C2(c).xd)^2 + (S2(n+1).yd-C2(c).yd)^2 ) ;
diss(c)=temp2;

C2(c).id;
if temp2<do
S2(C2(c).id).E = S2(C2(c).id).E- ( (ETX+EDA)*(4000) + Efs*4000*(
temp2*temp2 ));
end
All_dis(c)=temp2;

end

[diss,idd]=sort(diss,'ascend');
for i=1:1:cluster2-1

temps2=(sqrt( (S2(n+1).xd-C2(i).xd)^2 + (S2(n+1).yd-C2(i).yd)^2 ) );
min_dis2=9999999;
if temps2 > do
for j=1:1:cluster2-1

find_near_cluster=min(min_dis2,sqrt((C2(i).xd-C2(j).xd)^2+(C2(i).yd-C2(j).yd)^2));
if ( find_near_cluster<min_dis2 )
min_dis2=find_near_cluster;
end
end
S2(C2(i).id).E = S2(C2(i).id).E- ( ETX*(4000) + Efs*4000*( min_dis2 *
min_dis2));
end

end

if dead2>(n-ceil(n/5))
for i2=1:1:n
S2(i2).E=0;
end
end

end

```

Election des de cluster Head pour les nœuds normaux

```
if( ( SS(iS).ENERGY==0 && ( temp_randS <= ( pnrms / ( 1 - pnrms *
mod(rS,round(1/pnrms)) ) ) ) ) )
```

```
countCHsS=countCHsS+1;
  packets_TO_BSS=packets_TO_BSS+1;
  PACKETS_TO_BSS(rS+1)=packets_TO_BSS;
```

```
SS(iS).type='C';
SS(iS).G=100;
CS(clusterS).xd=SS(iS).xd;
CS(clusterS).yd=SS(iS).yd;
```

Affichage des noeuds sélectionnés

```
plot(SS(iS).xd,SS(iS).yd,'k*');
```

```
    distanceS=sqrt( (SS(iS).xd-(SS(nS+1).xd) )^2 + (SS(iS).yd-(SS(nS+1).yd) )^2
);
CS(clusterS).distance=distanceS;
CS(clusterS).id=iS;
XS(clusterS)=SS(iS).xd;
YS(clusterS)=SS(iS).yd;
clusterS=clusterS+1;
```

```
distanceS;
if (distanceS>doS)
SS(iS).E=SS(iS).E- ( (ETXS+EDAS)*(4000) + EmpS*4000*(
distanceS*distanceS*distanceS*distanceS ));
end
if (distanceS<=doS)
SS(iS).E=SS(iS).E- ( (ETXS+EDAS)*(4000) + EfsS*4000*( distanceS * distanceS
));
end
end
```

Election des de cluster Head pour les nœuds avancés en fonction des différentes distances et énergie

```
if( ( SS(iS).ENERGY==1 && ( temp_randS <= ( padvS / ( 1 - padvS *
mod(rS,round(1/padvS)) ) ) ) ) )
```

```
countCHsS=countCHsS+1;
  packets_TO_BSS=packets_TO_BSS+1;
  PACKETS_TO_BSS(rS+1)=packets_TO_BSS;
```

```

SS(iS).type='C';
SS(iS).G=100;
CS(clusterS).xd=SS(iS).xd;
CS(clusterS).yd=SS(iS).yd;
%      plot(SS(iS).xd,SS(iS).yd,'k*');

distanceS=sqrt( (SS(iS).xd-(SS(nS+1).xd) )^2 + (SS(iS).yd-
                (SS(nS+1).yd) )^2 );
CS(clusterS).distance=distanceS;
CS(clusterS).id=iS;
XS(clusterS)=SS(iS).xd;
YS(clusterS)=SS(iS).yd;
clusterS=clusterS+1;

% Calcul de l'énergie dissipée
%
distanceS;
if (distanceS>doS)
SS(iS).E=SS(iS).E- ( (ETXS+EDAS)*(4000) + EmpS*4000*(
distanceS*distanceS*distanceS*distanceS ));
end
if (distanceS<=doS)
SS(iS).E=SS(iS).E- ( (ETXS+EDAS)*(4000) + EfsS*4000*( distanceS * distanceS
));
end
end
end

end
end
end

%%%%%%%%%%

STATISTICSS(rS+1).CLUSTERHEADS=clusterS-1;
CLUSTERHS(rS+1)=clusterS-1;

```

Election du de cluster Head pour les nœuds normaux

```

for iS=1:1:nS
if ( SS(iS).type=='N' && SS(iS).E>0 )
if(clusterS-1>=1)
min_disS=sqrt( (SS(iS).xd-SS(nS+1).xd)^2 + (SS(iS).yd-SS(nS+1).yd)^2 );
min_dis_clusterS=1;
for cS=1:1:clusterS-1

```



```

        tempS=min(min_disS,sqrt( (SS(iS).xd-CS(cS).xd)^2 + (SS(iS).yd-
        CS(cS).yd)^2 ) );
    if( tempS<min_disS )
        min_disS=tempS;
        min_dis_clusterS=cS;
    end
end

% Energie dissipée par le sous chef
%
min_disS;
if (min_disS>doS)
    SS(iS).E=SS(iS).E- ( ETXS*(4000) + EmpS*4000*( min_disS * min_disS *
    min_disS * min_disS));
end
if (min_disS<=doS)
    SS(iS).E=SS(iS).E- ( ETXS*(4000) + EfsS*4000*( min_disS * min_disS));
End

%Énergie dissipée
%
if(min_disS>0)
    SS(CS(min_dis_clusterS).id).E = SS(CS(min_dis_clusterS).id).E- ( (ERXS +
    EDAS)*4000 );
    PACKETS_TO_CHS(rS+1)=nS-deadS-clusterS+1;
end

SS(iS).min_dis=min_disS;
SS(iS).min_dis_cluster=min_dis_clusterS;

end
end
end
% hold on;

countCHsS;
rcountCHsS=rcountCHsS+countCHsS;
sumS=0;
for iS=1:1:nS
    if(SS(iS).E>0)
        sumS=sumS+SS(iS).E;
    end
end
avgS=sumS/nS;
STATISTICSS(rS+1).AVG=avgS;
sumS;

```

end

LiveS=100-DEADS;

% Calcul du nombre de nœuds vivants

ANNEXE B: LES PUBLICATIONS TIREES DE LA THESE

Article 1 :

Diety, Guy. , Ali, K., Asseu, O., Zehero, B. and Hamouda, S. (2017) “**Energy Optimization in Wireless Sensor Network**”. *Engineering*, **9**, 880-889.
<http://www.scirp.org/journal/eng> ISSN Online: 1947-394X ISSN Print: 1947-3931
doi: [10.4236/eng.2017.910053](https://doi.org/10.4236/eng.2017.910053).

Le journal "Engineering" indexé par "Chemical abstracts: CASS et Electronics & Communications abstracts"

Article 2 :

Diety Guy L., B. Bolou Zehero, K. Eugène Ali, Olivier Asseu, and Soumaya Hamouda
“ON THE IMPROVEMENT OF ZigBee PROTOCOL INSIDE WIRELESS SENSOR NETWORK”

Far East Journal of Electronics and Communications © 2018 Pushpa Publishing House, <http://www.pphmj.com>[http://dx. doi.org/10.17654/EC018060945](http://dx.doi.org/10.17654/EC018060945) Volume 18, Number 6, 2018, Pages 945-965 ISSN: 0973-7006.

Le journal "Far East Journal of Electronics and Communications" est indexé par SCOPUS

<http://www.ijcaonline.org/archives/volume180/number2/28774-2017915948>

Engineering, 2017, 9, 880-889

<http://www.scirp.org/journal/eng>

ISSN Online: 1947-394X

ISSN Print: 1947-3931

Energy Optimisation in Wireless Sensor Network

Guy Landry Diety¹, Kouadio Eugène Ali¹, Olivier Asseu^{1,2*}, Bolou Bi Zehero¹, Soumaya Hamouda³

¹Institute National Polytechnique Houphouët Boigny (INPHB), Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

²Ecole Supérieure Africaine des TIC (ESATIC), Abidjan, Côte d'Ivoire

³Ecole Supérieure des Communications de Tunis (Sup'Com Tunis), Tunis, Tunisie

Email: *oasseu@yahoo.fr

How to cite this paper: Diety, G.L., Ali,

K.E., Asseu, O., Bi Zehero, B. and Hamou-

da, S. (2017) Energy Optimisation in Wireless Sensor Network. *Engineering*, 9, 880-889.

<https://doi.org/10.4236/eng.2017.910053>

Received: September 25, 2017

Accepted: October 24, 2017

Published: October 27, 2017

Copyright © 2017 by authors and Scientific Research Publishing Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Abstract

The solution we propose optimizes the energy inside the wireless sensor network (WSN) with higher performance. The WSN is composed of many sensors nodes which collect the information, treat that information then send it to the base station. The information is received by the base station (BS) then data are sent to the users by that BS. The most important element in sensor node is energy, as the lifetime of wireless sensor network depends on the sensor node energy. So many researches had been made in order to improve this energy basing routing protocols. As a result, we are able to propose a solution that optimizes this energy. In this paper, we are presenting a new approach of selecting node sensor base on routing protocol and process to send data to the base station. This ameliorates wireless sensor network lifetime and increases the transmission sensor node to base station.

Keywords

Wireless Sensor Network (WSN), Base Station (BS), Sensor Node (SN), Energy, Routing protocol, Optimisation

Introduction

The apparition of internet of things changed many things in the word of technologies. This technology permit to connect anything (house, office, hospital, road, car ...) and human to internet. We can find internet of things in many domains (army, medicine, automobile, house, industries ...). This participate in creating smart environments.

One most thing in this technology is the sensor network, particularly the wireless sensor network (WSN). The WSN is composed of sensors nodes which can receive data, trait them and send them to the base station (BS). The BS send all information to the users.

According to thing we want to follow, several sensors nodes can be deployed in perimeter or zone to cooperate on sensing a physical phenomenon. Sensor networks hold the promise of revolutionizing sensing in a wide range of application domains because of their reliability, accuracy, flexibility, cost-effectiveness, and ease of deployment [1].

At network layer, several approaches have already been followed by the researchers towards developing energy efficient routing schemes like viz. flat routing, hierarchical routing, location based routing etc. Among these approaches hierarchical routing sounds to be the most attractive as many algorithms have been developed treating this as a base [1].

Basically, each sensor node comprises sensing, processing, transmission, mobilizer, position finding system, and power units (some of these components are optional like the mobilizer). Some popular cluster based routing schemes towards achieving the required goal of energy efficiency to prolong network lifetime are discussed here in brief: The LEACH [2], introduced by Heizelman et Al., is one of most popular clustering based routing protocols and most of the other clustering schemes proposed in the literature are aimed at enhancing energy efficiency at one or more phases in LEACH. LEACH determines a fraction p of all the sensor nodes that may become cluster heads a priori.

It may not always provide any assurance either about the number of cluster head nodes or how well distributed these clusters are [1].

Energy efficient announcement is very important to extend the sensor networks. In recent times, different routing protocols have been reported for wireless sensor networks. Many protocols apply single optimal route in support of data transmission.

The optimal route is selected based on the metrics, such as minimum hop, high remaining energy, minimum broadcast etc. to route the data [3], [4]. Routing is very challenging in wireless sensor networks. One of the most difficulties that involve the sensor network lifetime refers to sensor nodes in the neighbourhood of the sensor sink, whose activity effect a high traffic on this sequence of sensor nodes [5].

Nodes in networks are grouped into clusters, and nodes that have higher remaining energy are selected as the cluster head's (CH). In each cluster, the nominated CH node receives and aggregates data from all sensor nodes in the cluster. Usually, the sizes of the data off all sensor node are the same and the aggregated in data at the CH node has the same size with the data of every sensor in the cluster. As the data are aggregated in the CH node before reaching a BS (base station), this technique reduces the amount of information sent to the distant BS, hence saves energy. For example, if each sensor in the cluster sends a message of 100 bits to the CH node, then the CH node sends the aggregated message of 100 bits to the BS [8]. Details are given in [2] [6] 7].

When in LEACH cluster-head are selected randomly, EECS selects a node as a cluster-head with the highest residual energy among all nodes, competing for being a cluster head. Many types of existing routing protocols are developed to save power consumption. In these protocols, cluster based routing protocols are found to be more energy efficient. A cluster head is selected to aggregate the data received from root nodes and forward these data to the base station in cluster based routing [8].

By virtue of heterogeneity in terms of energy, lifetime of the network can be extended. An algorithm is functional if the area of interest is covered by active nodes. The period for which the network is functional is termed as persistent period [9].

The connection between destination and task manager node is the public networks in the form of satellite. The end users receive the data from the task manager node and perform processing on received data [10]. Energy plays effective role in wireless sensor network. There are various challenges for deploying wireless sensor network like scalability, programmability maintainability, quality of services, types of service and lifetime of the network [11]. Our proposed method increase data send to the base station and make better lifetime of WSN.

I – Method and process

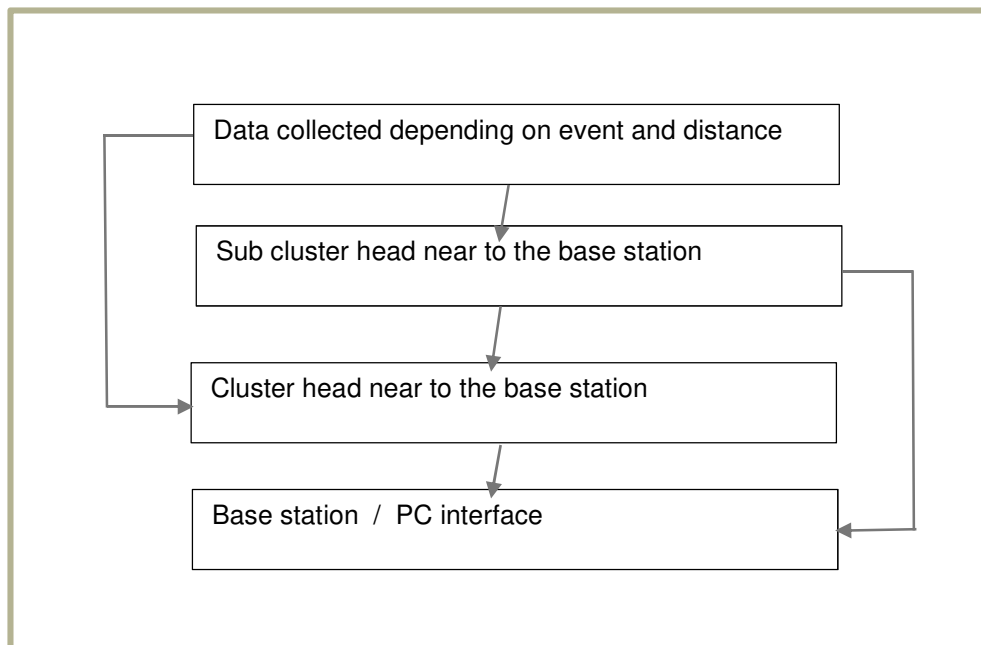
Our approach is to improve the protocol LEACH model Ravi Tomar which inspire by protocol EEPSC (Energy-Efficient protocol with static clustering).

The selection of the cluster head is made by compared residual energy off all sensor nodes in the sub-area. The sensor node which energy is higher than the other designed cluster head. With Ravi Tomar's protocol, there is a new function added. We must compare first residual energy and secondly centralize the sensor node according to all sensor nodes in the area. After a round, another cluster head is selected.

Ravi Tomar's protocol is an improvement of the protocol EEPSC [1]. Ravi Tomar's protocol prefer to centralize the cluster head selected. But the inconvenient is the cluster head will be more solicited and will dead quickly, because he will be the only one which working every time.

To avoid the dead node quickly inside the WSN, we propose in **Figure (1)** how to increase lifetime by selecting some sub-cluster head around the cluster head selected. Doing this, we reduce more activities of the cluster head by delegation of transmission sub-cluster head to base station and we added a new function which is the distance between the event, cluster head, sub-cluster head and base station. According to the event, if the distance between cluster head – base station is more than distance sub-cluster head – base station then the sub-cluster head transmit to a neighbour and join the base station after.

This ameliorate lifetime of WSN, all sub-clusters head work together to help cluster head at periodical time with less energy. We have more transmissions and less dead nodes. Our sending process is described by the follow scheme.



II – Process to select cluster head and sub-cluster head

Our task consists to improve Ravi Tomar's protocol. So, we should work with he's same conditions (parameters) and prove that we did a good improve WSN's lifetime.

II – 1 Cluster Head selection

Let $n, p, r \in \mathbb{N}^*$

Let $A = \{1; 2 \dots q\}$ the set of nodes of zone Ω rectangular of length X_m and width Y_m (not Cluster Head).

$P_\Omega = \{ \Omega_i, i \in \{1; 2; \dots; q\} / \Omega_1 \cup \Omega_2 \dots \cup \Omega_q = \Omega \text{ and } \Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset \text{ if } i \neq j \}$ a partition of Ω .

We denote A_i the set of nodes of zone Ω_i

$P_A = \{A_i, i \in [1; q], \text{ like } A_1 \cup A_2 \dots A_q = A \text{ with } A_i \in \Omega_i \text{ and } A_i \cap A_j = \emptyset \text{ if } i \neq j \}$

We denote CH_i the cluster head of zone Ω_i and SCH_i a sub-cluster head of the zone Ω_i .

Each node K of Ω generate a random number $rn(k)$ comprise on 0 and 1.

The eligibility threshold value of CH_i is defined by:

$$T(k) = \frac{P}{1-P * r \bmod (\frac{1}{P})} \text{ if } k \in A \text{ and } T(k) = 0 \text{ if } k \notin A \quad (1)$$

where P is the percentage of cluster heads zone, r is the number of rounds

If $rn(k) \geq T(k)$ then the node k is eligible.

For any CH_i and CH_j distinct it's necessary that:

$$d[CH_i, CH_j] \geq \sqrt{\frac{X_m * Y_m}{K_{opt}}} = \text{MSD (minimal distance between two clusters head)}. \quad (2)$$

Where X_m, Y_m are the length and width of Ω respectively. K_{opt} is the optimal number of cluster head, $d(x,y)$ is the distance between x and y .

II – 2 Sub-Cluster Head selection

The eligibility threshold value of SCH_i is defined by:

$$T_s(k) = \frac{P_s}{1-P_s * r \bmod (\frac{1}{P_s})} \text{ if } k \in A \text{ and } T_s(k) = 0 \text{ if } k \notin A \quad (3)$$

where P_s is the percentage of sub-cluster heads zone, r is the number of rounds

If $rn(k) \geq T_s(k)$ then the node k is eligible to be sub-cluster head.

Let S_i be the set of nodes in $A_i - \{CH_i\}$ which verify relation (3).

Then the m_i elements of S_i which energies are better are the SCH_i .

If $S_i = \emptyset$ then the SCH_i are the elements of $A_i - \{CH_i\}$ verifying energy condition. Even if S_i is empty, we select a few nodes which random value and energy value are the closest to the threshold value.

III – Transmission method

We define the following distance:

$$d(CH_i, BS) = \sqrt{(X_{CHi} - X_{BS})^2 + (Y_{CHi} - Y_{BS})^2} \text{ the distance from } CH_i \text{ to the Base Station and}$$

$d(\text{SCH}_i, \text{BS}) = \sqrt{(X_{\text{SCH}_i} - X_{\text{BS}})^2 + (Y_{\text{SCH}_i} - Y_{\text{BS}})^2}$ the distance from SCH_i to the Base Station.

Let Ω_e be the zone where the event happened. If Ω_e is far from the base station, we choose Ω_j zone in the neighbourhood zone of Ω_e which contains the cluster head or the sub-cluster head closer to the base station.

The information must firstly be transmitted from Ω_e to Ω_j . Thus, the cluster head or sub-cluster head nearest to the event transmits the information to the cluster head or sub-cluster of Ω_e the nearest to the cluster head or sub-cluster head Ω_j that is the nearest to the base station. The process goes on up to the zone nearest to the base station. Within that last zone, the cluster head or the sub-cluster head nearer to the base station transmits the information to the base station.

If Ω_e is the zone nearest to the base station, then the cluster head or the sub-cluster head of Ω_e the nearest to the event transmits the information to the cluster head or the sub-cluster head the nearest to the base station. This in the last position is then in charge of transmitting the information to the base station.

In **Figure2**, we propose a method that permits the cluster head to have a long lifetime and avoid more the death of sensor node in the network. With this method, we get a best result than protocol LEACH, protocol EEPSC and Ravi Tomar's protocol.

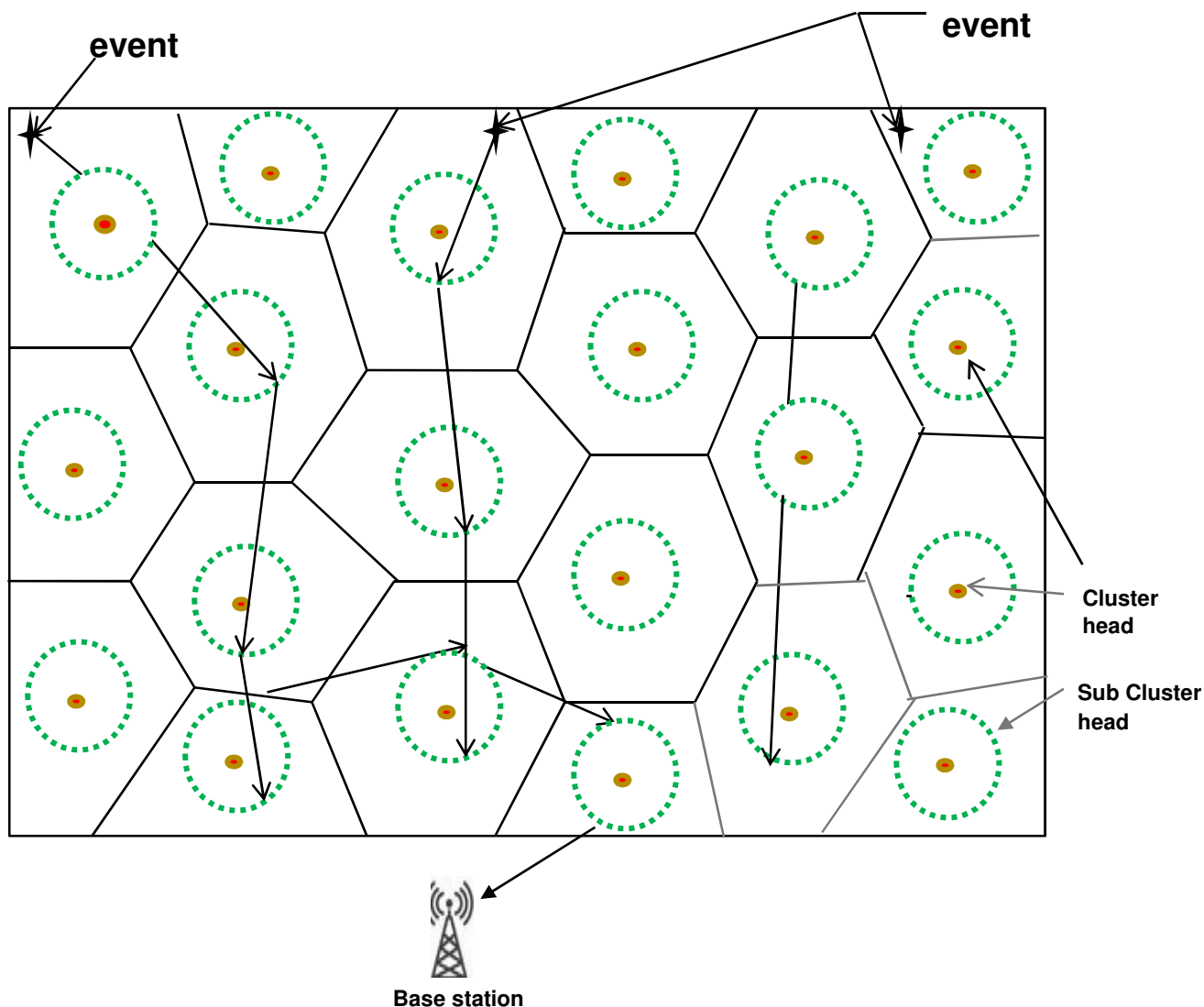


Figure 2: Transmission cluster head and sub-cluster to base station

IV - Simulation and Results

To compare two methods, we must do some experiences with the same conditions. So that, software used, conditions environment, number of sensor nodes... all the same. This **Table 1** resumes all parameters used.

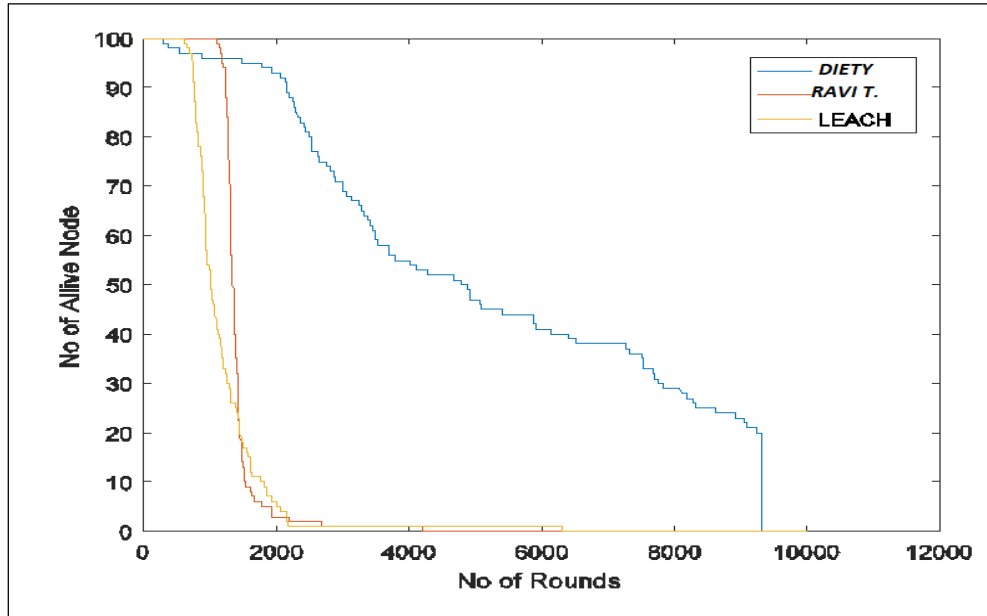
Parameter	Meaning	Values
M x N	Network Area Dimensions	100 meter x 100 meter
N	Number of SNs	100
E _{elec}	Electronic energy	50 nJ / bit
EDA	Data aggregation energy	5 nJ / bit / message
E ₀	Initial energy	0.5 J
k	Size of the message	4000 bits
P _{opt}	Probability	0.05
ε _{fs}	Friss free space	10 pJ / bit / m ²
ε _{mp}	Friss multi-path	0.0013 pJ / bit / m ⁴
a	Energy level for Advance nodes	3
b	Energy level for Intermediate nodes	1.5
m,x	% of nodes to be Advance and Intermediate	0.2,0.3
BS	Base Station Location	(500,500)

Table 1: Parameter Settings

A – Network lifetime per round

The simulation gives many results about lifetime of WSN's, number of packets transmitted to base station and cluster heads.

We observe the stability of the network (the interval time from the start of network operation and the death of sensor node) after 10000 rounds in **Fig (3)**. All sensor nodes from LEACH and from Ravi Tomar's protocol dead quickly after 2500 rounds. But our protocol DIETY make alive sensor nodes to 9500 rounds. We can transmit more data to base station. The protocol DIETY is far better because of its awareness in terms of energy heterogeneity and the use multi-hoping concept in it.



B – Number of packets transmitted to base station

Depending on the lifetime of WSN, with our method, we can transmit more data to base station. The **Fig (4)** shows the number of CHs and number of packets transmitted to BS per round. It is found that DIETY provides continuous CH and have highest successful data rate as compared to RAVI T. and LEACH for more number of rounds. LEACH and Ravi T. performs poorly and fails to provide optimal number of CHs due to their distributed nature of selecting CHs. Due to this uneven generation of CHs per rounds for LEACH and Ravi T. shows the negative impact on the handling of network traffic which then results in the loss of packets due to insufficient TDMA slots.

Also, DIETY is stable when number of CH varies from 30-50 because if we increase the number of CH (included sub-cluster head becomes cluster head to transmits) then it results in that non-CH nodes can easily get CH locally and perform data aggregation.

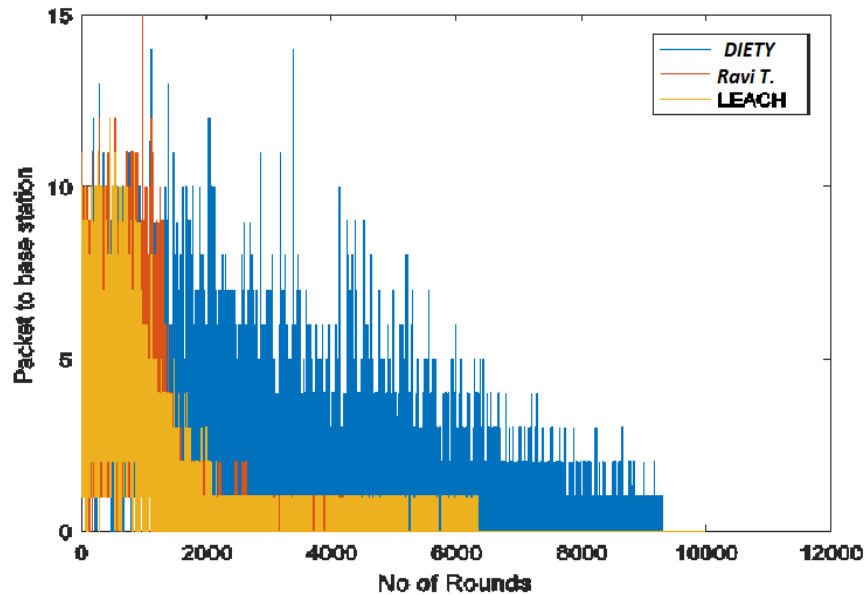


Fig 4: Packets transmit to base station

Conclusion

Our method and approach shows that we can get better result than Ravi Tomar's method. According to this approach, all sensor nodes cooperate and we have more cluster head (included sub-cluster head) to send more packets to the base station.

The lifetime of WSN becomes more long and dead sensor nodes are more reduce. Our method is not the best of the best method but it's contributed to improve or increase lifetime of WSN. Having more lifetime of WSN, prove that we can get more information about internet of things because sometime data has been sending by WSN.

REFERENCES

- [1] Ravi Tomar "Qos issues in Wireless Sensor Networks An Energy Efficient Approach" LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014
- [2] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balkrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks", in proceeding of 33rd Hawaii International Conference on System Science, Vol. 2, Jan. 2000, pp. 10
- [3] Ochirkhand Erdene-Ochir et al, "Resilient Routing in Wireless Sensor Networks: Gradient-Based Routing in Focus" IEEE, Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM), July 2010, pp. 478-483.
- [4] Long Cheng, Das, S.K, Jiannong Cao, Canfeng Chen, Jian Ma, "Distributed Minimum Transmission Multicast Routing Protocol for Wireless Sensor Networks" IEEE 39th International Conference on Parallel Processing (ICPP), 2010, pp. 188-197.
- [5] Rajevv Arya and S.C Sharma "Analysis and Optimization of energy of sensor node using ACO in wireless sensor networks" International Conference on Advanced Computing Technologies and Applications (ICACTA), 2015, pp. 681-686

- [6] Thanh Tung Nguyen, Van Duc Nguyen “Optimizing the operating time of wireless sensor network” EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking, 2012, doi:10.1186/1687-1499-2012-348
- [7] T Nguyen Thanh “Heuristic Energy-Efficient Routing Solutions to Extend the Lifetime of Wireless Ad-Hoc Sensor Networks” Springer, LNCS 7197, 2012, pp. 487-497
- [8] Zahoor A. Khan, Srinivas Sampalli “AZR-LEACH: An Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks” International Journal Communications, Networks and System sciences, 2012, pp. 785-795
- [9] Mehra, Pawan Singh, M. N. Doja and Bashir Alam “Energy efficient self organising load balanced clustering scheme for heterogeneous WSN” Energy Economics and environment (ICEEE), 2015 International conference on IEEE, 2015
- [10] Salim El Khediri, Nejah NASRI “A New Approach for Clustering in Wireless Sensor Networks Based on LEACH” 2014.
- [11] Manisha and Nidhi Mittal “Deterministic Relay Node based Improved LEACH Protocol for Wireless Network: A Review” International Journal for Innovative Research in Science & Technology, Vol 3, Issue 01, 2016, ISSN: 2349-6010



ON THE IMPROVEMENT OF ZigBee PROTOCOL INSIDE WIRELESS SENSOR NETWORK

Guy L. Diety¹, B. Bolou Zehero¹, K. Eugene Ali¹, Olivier Asseu^{1,2} and
Soumaya Hamouda³

¹Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB)
Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

²Ecole Supérieure Africaine des TIC (ESATIC)
Abidjan, Côte d'Ivoire

³Ecole Supérieure des Communications de Tunis (Sup'Com Tunis)
Tunis, Tunisia

Abstract

The solution we present improves the protocol ZigBee and makes a better transmission with this protocol inside wireless sensor network (WSN). Many things use ZigBee protocol to communicate in WSN, specially sensors nodes. According to the method used by the ZigBee protocol, nodes (end node), router (node become router) and node coordinator communicate with each other to send data to the base station.

Our method consists to ameliorate the topologies and transmission method inside ZigBee protocol, to get more data transmitted and long life of WSN. By calculated the distance between nodes in order to get short distance. This reduces more replay acknowledgement to avoid slowdown and long life of WSN. This method permits nodes to keep more energy.

Received: February 25, 2018; Accepted: April 2, 2018

Keywords: protocol ZigBee, node, coordinator, router, end device, wireless sensor network, base station, topology, energy, data, transmission, distance, amelioration.

Introduction

The apparition of wireless sensor network (WSN) has made a very big change in the world of technology. Everything can be connected to a network anywhere. This becomes possible by deploying nodes in some fields. Nodes communicate with each other, treat data and send it to the base station. The internet of things (IOT) is quickly becoming a reality, WSN plays an important role in IOT, and is considered as an emerging technology with a wide range of applications in many areas [1]. This has become an important research field that is rapidly growing due to the development of new technologies in inexpensive sensors [2]. As many interesting and diverse applications of WSNs are explored, these has become an urgent need to develop a communication and management protocol that is tailored for the special environment and requirements of WSN operations [2]. There are many protocols used by nodes to communicate and one of them is ZigBee protocol. ZigBee is a specification that enhances the IEEE 802.15.4 standard by adding network and security layers and an application framework, it provides a suite of high level communication using small, low-power digital radios for Low-Rate Wireless Sensor Networks [3]. Some recent researches of ZigBee technology have been massively useful in all kinds of sectors such as the Xbee ZigBee, Smart Wireless Light [4], Solar power utility, Clean Hands Safe Hands wireless system and in NASA space programs [5].

ZigBee is known to have many appealing advantages like low-cost, high reliability and low-complexity, and has a wide application range, whether in industrial automation, intelligent control, or medical health etc [6], [7].

First of all, our task will be describing ZigBee protocol and its architecture, and then at the second part we will explain what amelioration or optimization we did on it with graphics and comments.

1. ZigBee protocol description

(a) The characteristics of ZigBee protocol

ZigBee is an uncomplicated packet data protocol which is designed for less weight wireless network. The MAC layer and Physical layer of ZigBee are specified with IEEE 802.15.4 standards. The architecture of ZigBee has four layers (Physical, MAC, Network and Application). ZigBee protocol holds static, dynamic and mesh topologies [8]. Its nodes in the network can be divided into full function device (FFD) and reduced function device (RFD) according to IEEE 802.15.4. Meanwhile, on the basis function,

its nodes can also be classified into ZigBee coordinator, router and terminal device. The first two can communicate with any devices while the third one can only exchange information with the router which is connected to it [9]. The coordinator is responsible for transmitting information if there is communication between two terminals.

ZigBee protocol provides self-healing capacity for the network to manage defects due to several environmental effects to sense and recover from network or connection link faults without the help of human interference [8]. There are three frequency bands for 27 channels use by ZigBee. Frequency 2.4 GHz band has 16 channels with maximum rate of 250 kbps, frequency 902-928 MHz has 10 channels with maximum rate of 40 kbps, and frequency 868-870 has 1 channel with maximum rate of 20 kbps.

ZigBee protocol network topology can be divided into star, tree and net configuration [10].

(b) The topology and architecture of ZigBee

The topology

The topology of ZigBee composed in three parts: Star, Tree and Net configuration (mesh) [12].

The star topology is based on a center coordination. The terminals devices directly communicating with the coordinator. The coordinator is responsible of transmitting information. But if there is much communications, there is inconvenience: The coordinator is overloaded, and is poor in flexibility. Nodes must be enough because of effective communication [8].

About Tree topology, it's more complex than star. It has ZigBee coordinator and router which can communicate with both terminals and coordinator. This method expands network coverage area. But inconvenience is if there is extreme weather and a node is disconnected from network, other nodes which are connected to it are fallen off [8].

The Net structure is very complex than the others. Nodes routers have the same status. It has the characteristic of automatic establishment and maintenance. Router node can communicate with both terminals and coordinator. Node router has its own communication range. So that If there is any malfunction of one router node, the node which is connected to it will send information to another node within its communication area. Such feature can not only enable information transmitted through various pathways, but also improve security

[8]. The following picture (Figure 1) described the ZigBee network topology [13].

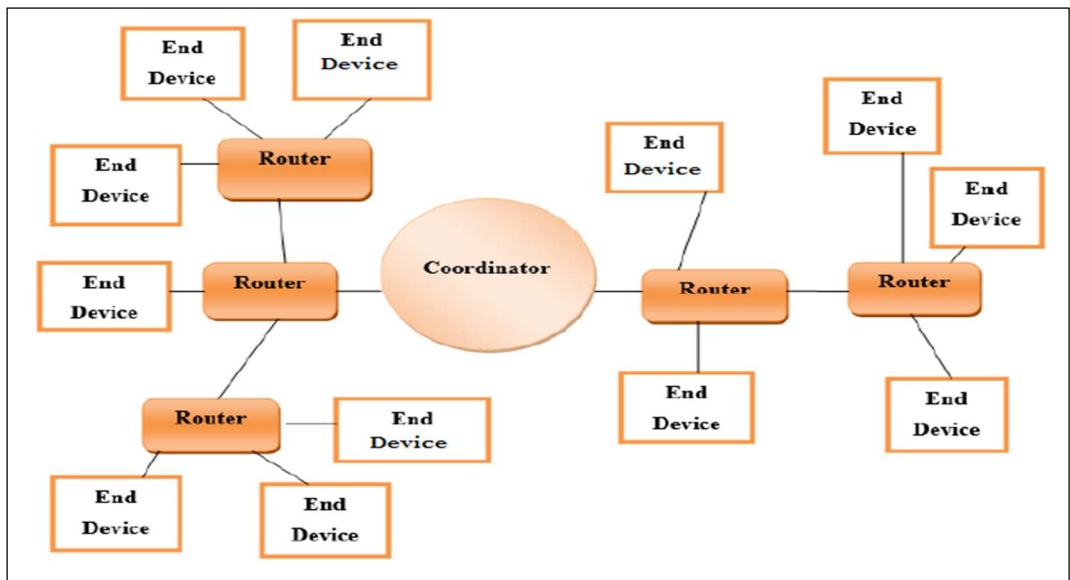


Figure 1: ZigBee Network Topology

The architecture

The following picture (figure 2) shows the architecture of ZigBee.

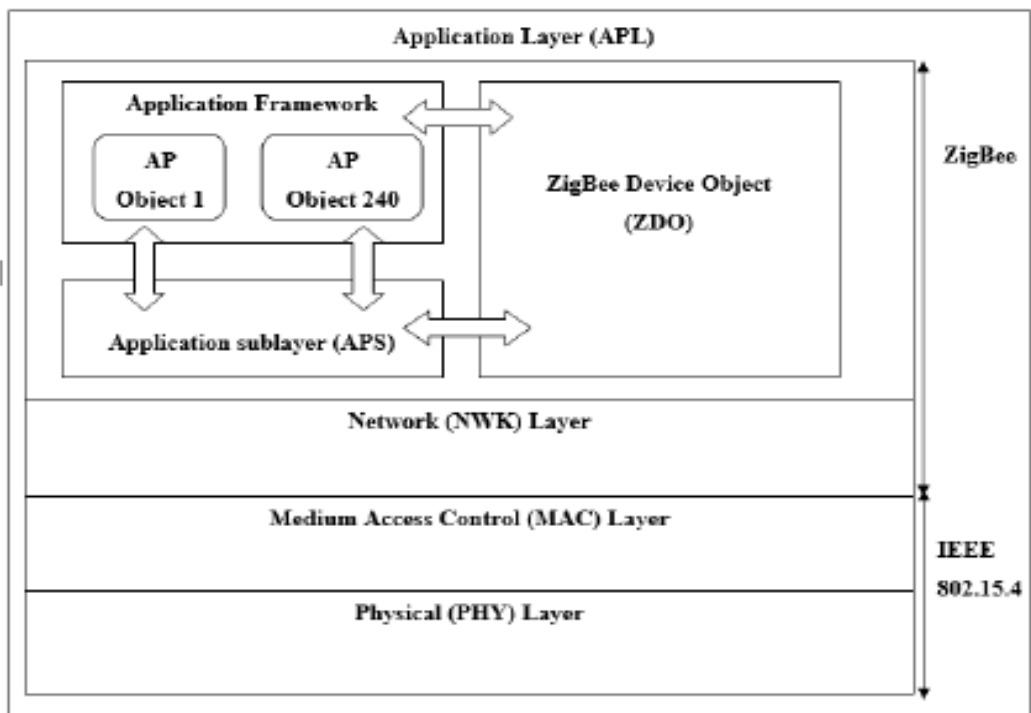


Figure 2: Architecture of ZigBee

Physical Layer: It is used to define the connector between wireless channel and MAC layer, active and unlock wireless transmitter, inspect channel energy, choose channel frequency, output and receive data.

MAC layer: It used to generate network signal of coordinator, receive data of network layer, transmit data between equipotent substances and guarantee point-to-point connection in ZigBee network.

It is responsible for addressing data to decide either where the frame is coming from or going. Besides it gives multiple access control for example CSMA/CA which allows reliable data sending [14].

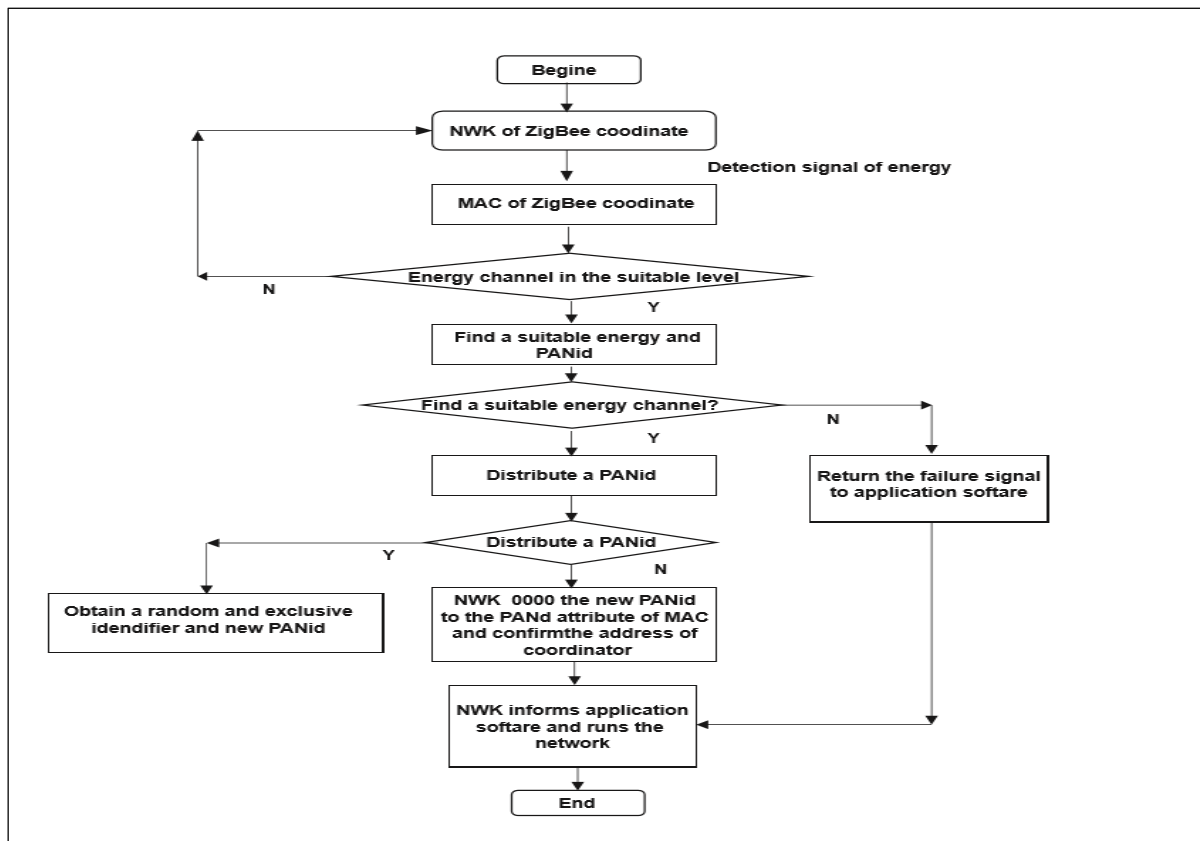
Network layer: It is the core of ZigBee protocol. It can operate MAC layer with the main function of proving service connector to application layer, giving security that the coordinator and router will allow devices join and quit the network, controlling receiver's initiation and receiving time.

It provides interface between application layer and MAC layer. This layer is implemented by ZigBee alliance which is an organization of companies which work together for the better standards [11].

Application layer: It is mainly used to maintain binding table, transmitting information between bound devices, define the role of device in network, and establish security relations between network devices [9].

(c) Network procedure

Figure 3 shows the procedure of establishing the network. Firstly, the network layer of this coordinator will send energy channel inspection signal to MAC layer. The MAC layer will automatically check whether there is energy channel that has allowable energy level. If there is not such one channel, it will made one signal get back to application layer, if there exists any, it will choose a suitable one and distribute a Personal Area Network Id (PANId) value and judge it whether or not there is conflict with the original PANId [15] [16]. If yes, another random and unique value will be obtained again. Next, the network layer writes this value into MAC layer's PANId attribute together with the address of coordinator. Finally, network layer informs application layer to operate new network. Thus, the node has established a new network which is accessible to devices.



(d) Routing protocol and Communication procedure

There are two types of routing algorithm: **AODV** (Ad Hoc On Demand Distance Vector) and **TREE based routing algorithm**.

F-AODVjr algorithm is the improved edition of AODVjr [17] which is an improved the one of AODV. Compared with the latter one, the former algorithm has advantages of lower consumption of energy and higher survival rate of nodes. It can help to distinguish which node has less energy and which one is abundant according to the rest of energy and level of energy threshold partition node. Meanwhile, it will make the node with sufficient energy play main routing role to decrease the amount of died nodes, reducing node death rate. In F-AODVjr, an energy threshold $E_{x(n)}$ is set which is dynamically updated and define that the node whose rest energy is more than $E_{x(n)}$ is considered as sufficient energy node, while the less one has deficient node. The sufficient one will be used to transmit data.

The deficient one only uses to transfer data packet of the destination node within one kind of range or receive destination node's own data grouping. Calculated $E_{x(n)}$ as followed.

$$E_{x(n)} = \begin{cases} \varepsilon\sqrt{E_0} & n = 1 \\ E_{x(n-1)} - \frac{\sigma}{n}\sqrt{E_0} & 1 < n < N_{total} \end{cases} \quad (1)$$

When $n = 1$, then $E_{x(1)} = \varepsilon\sqrt{E_0}$ and $E_{x(1)}$ is the initial energy threshold set by the network, ε is the specific coefficient to adjust the setting of the initial threshold. $E_{x(n-1)}$ stands for the energy threshold before update and α is a certain coefficient to control decreasing speed of the energy threshold.

N_{total} is on behalf of total node amount. It is a kind of constant while n is a variable. Set two interior counters C1 and C2 for ZigBee coordinator. If there is one node whose rest energy is lower than the current value $E_{x(n)}$, the coordinator then shall send information of this node to make the count value of C1 increase 1. According to the value of C1, the coordinator can calculate the number ratio Q of deficient nodes and the total nodes. Set a threshold $E_{threshold}$ ($0 < E_{threshold} < 1$). When $Q > E_{threshold}$, the coordinator makes the value of C2 increase 1 and n value is representative of C2. Thus, when n changes to increase 1, $E_{x(n)}$ value will finish one update. Afterwards, adjust C1 to 0 and keep C2 unchanged. Then the value of $E_{x(n)}$ can be obtained.

$$\begin{cases} E_{x(1)} = \varepsilon\sqrt{E_0} \\ E_{x(2)} = E_{x(1)} - \frac{\sigma}{2}\sqrt{E_0} \\ \dots \\ E_{x(n)} = E_{x(n-1)} - \frac{\sigma}{n}\sqrt{E_0} = E_{x(1)} - \frac{\sigma}{2}\sqrt{E_0} - \dots - \frac{\sigma}{n}\sqrt{E_0} \end{cases} \quad (2)$$

If is known from $E_{x(n)}$ calculating method that the initial stage of network operation, energy threshold $E_{x(n)}$ decreases slowly and when n increases, the decreasing range of $E_{x(n)}$ value becomes smaller and smaller. In the later period, node energy is generally insufficient. F-AODVjr algorithm can enable most of the nodes to participate routing transmission as sufficient energy nodes for that its energy decreasing range becomes slower and slower. Such method can avoid the phenomenon of network congestion caused by small quantity of nodes, thus reducing energy waste [9].

TREE based routing algorithm

The system model Tree based routing protocol (TBRP) as shown in figure 4 has the following property [18].

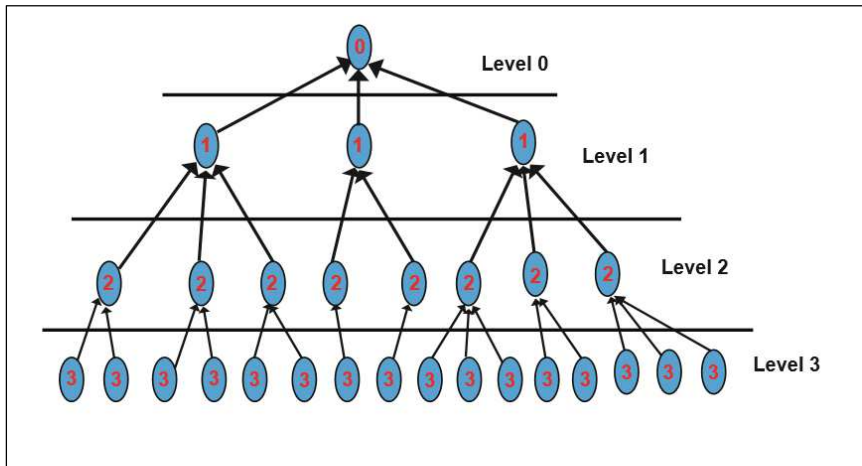


Figure 4: Architecture of TBRP

The whole of the nodes in the network form a tree whilst the node of the tree has some degree constraints depending on its level. The distance between the two levels is equal to the radio range of the sensor node (which is approximately equal to the maximum distance covered by the node in 1 second). This algorithm works in three phases: **tree formation phase, data collection and transmission phase, and finally purification phase.**

In **tree formation phase**, step 1, base station broadcast an initial init message which contains the information about the position of each base station and level distance. When any node gets this message it first calculates the Euclidian distance from the base station. And according to that distance assigns a level to itself. The following figure 5 and figure 6 show a join request broadcasting and join acknowledgement by the highest one.

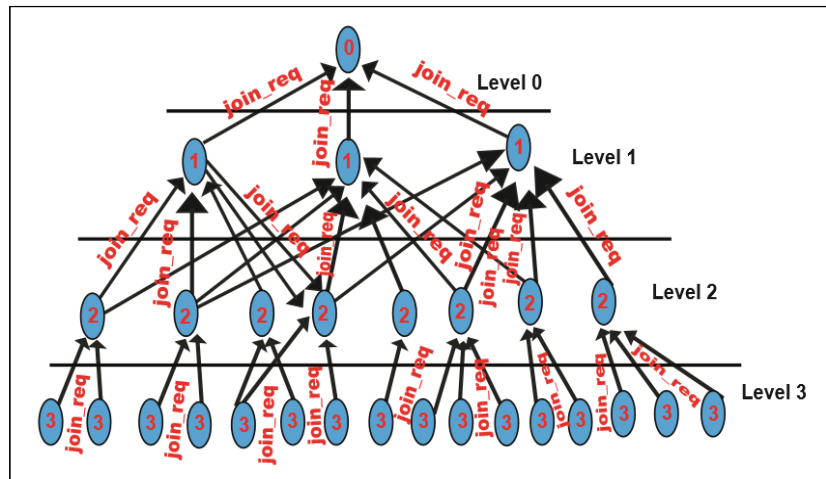


Figure 5: Join request broadcasting

In the step 2, after assigning level, each node broadcasts the join request (join_req) packet as shown in fig. 5, which contains the node Id and level of the node.

The step 3, when any node listen a join request, it first checks its parent and the level of the join_req. if the parent of the node is null or level is higher than or equal to the node itself then node discard this join_req packet; otherwise the node check its node degree if the node degree is greater than or equal to the degree constraint, and also discard the request; otherwise response with a positive acknowledgement (join_ack) as shown in figure 6.

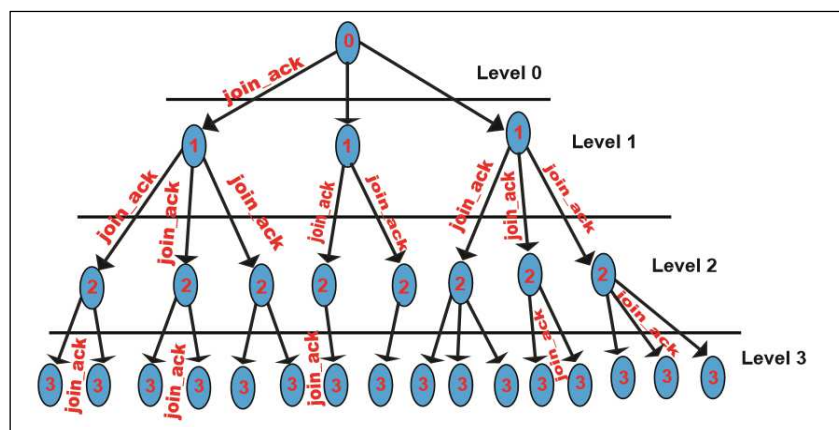


Figure 6: Join Acknowledgement by higher

In the step 4, the request node joins the node from which it gets the first acknowledgement and as a child node to itself, then the parent node adds this node to its child list and increase the node degree count by 1.

The step 5, step 2-4 are repeated until whole tree has been formed.

The following figure 7 shows child node sending data to its parent node.

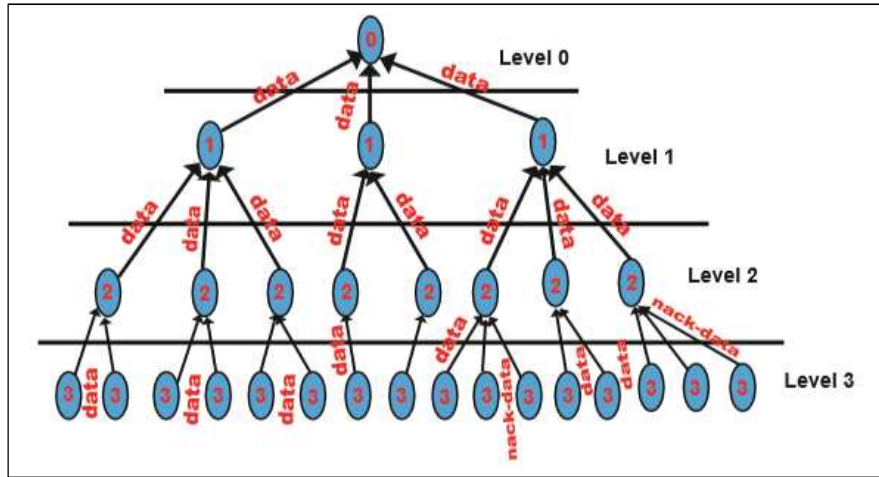


Figure 7: Child node sending data to its parent node

About **data collection and data transmission** phase, step 6, after tree formation phase, each node sends its child list to its father node. According to the child list, the father node sends a TDMA schedule to its child node. In its schedule, the child node can send its data to the father node.

Step 7, if the child node has the data then it forwards its data to its parent node in its time slot (TDMA slot); otherwise it sends a nack data to its parent node. CSMA/CA approach is used by the node to send the data as shown in figure 7.

Step 8, the parent node aggregates its data with children data and send it to its parent node. Finally, the node near to the base station sends the collected data to the base station as shown in figure 7. The following figure 8 shows the movement of the node.

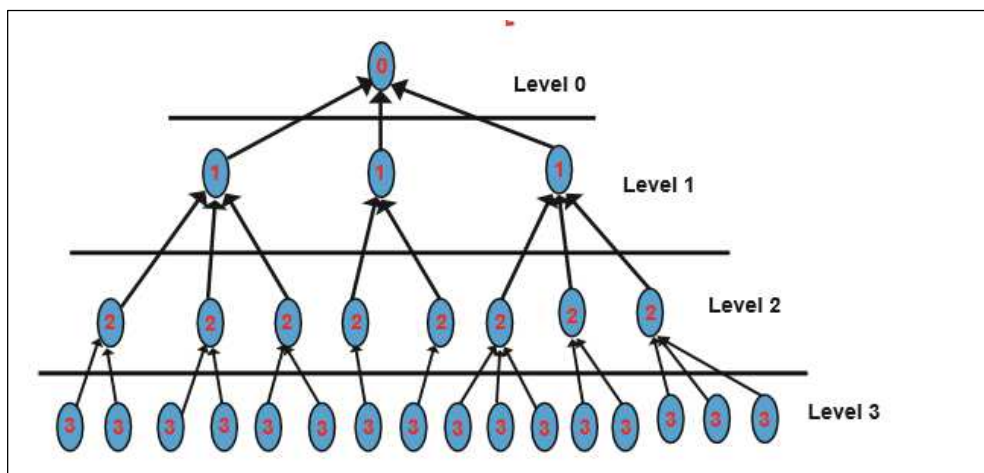


Figure 8: The movement of node

According to **the purification phase**, this phase handles the several situations such as failure or movement of the parent or child node as shown in figure 8, figure 9, figure 10, figure 11 and energy level of the nodes.

Step 9, when a node moves from one location to another location, it changes its position. There are two possibilities regarding the movement of node as shown in figure 8. One, the node either move within the same level or two, one level above or below, when the position of the node will get changed it localizes itself by localization algorithm. The following figure 9 shows the node broadcast.

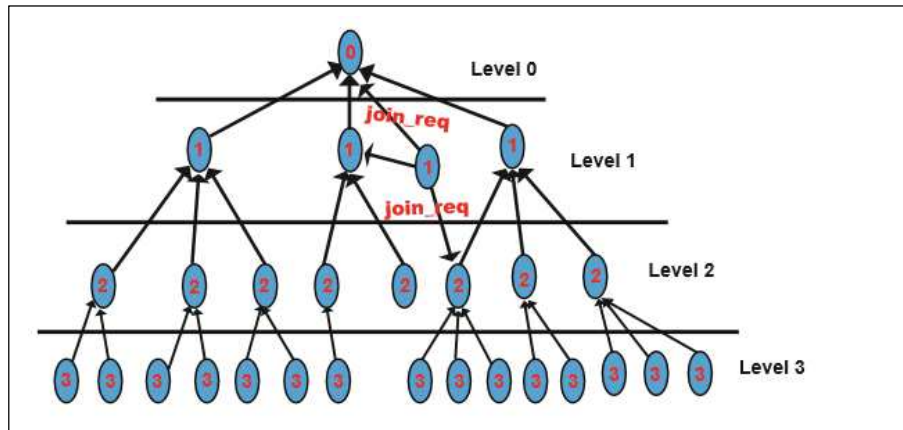


Figure 9: Node broadcasts its join request

After calculating its position, node calculates its distance from the base station and re-calculates its level.

Step 10, if the level of the node does not change, then node checks that it is in the range of its father or not, if it is within the range of its parent node then no need to re-join the tree; otherwise node change its level according to the distance from the base station and broadcast a join request as shown in figure 9 and adds the new node in its father node list from which it will get the join_ack and remove the old one. The following figure 10 shows the new tree formation.

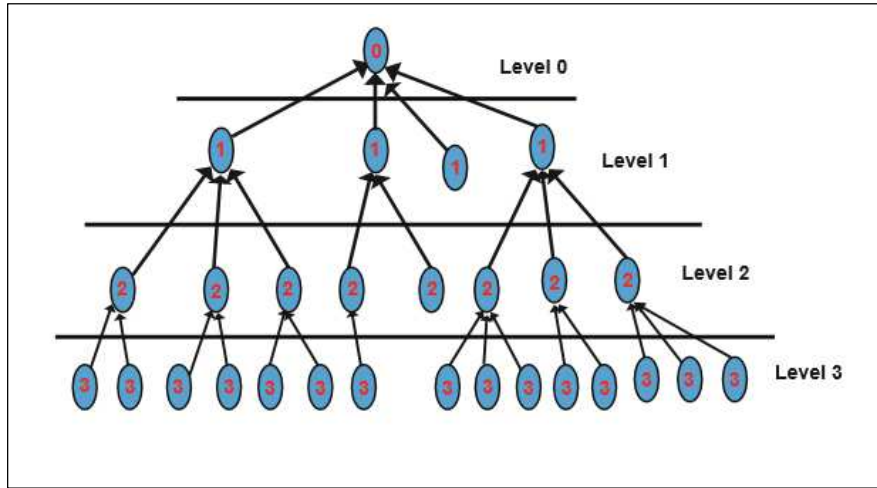


Figure 10: The new tree formation

In step 11, handling the node invalidation:

*Child node invalidation: when the data transmission takes place if the parent node does not get any response from any of its child it adds this node in the invalid list and wait for the next time slot. In the next time slot, the node not getting any response, this node will infer as an invalid child and remove this node from its child list as shown in figure 11.

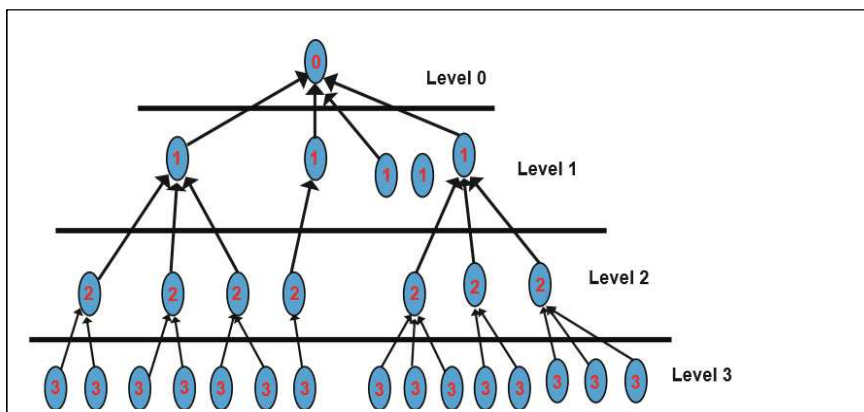


Figure 11: Child node invalidation

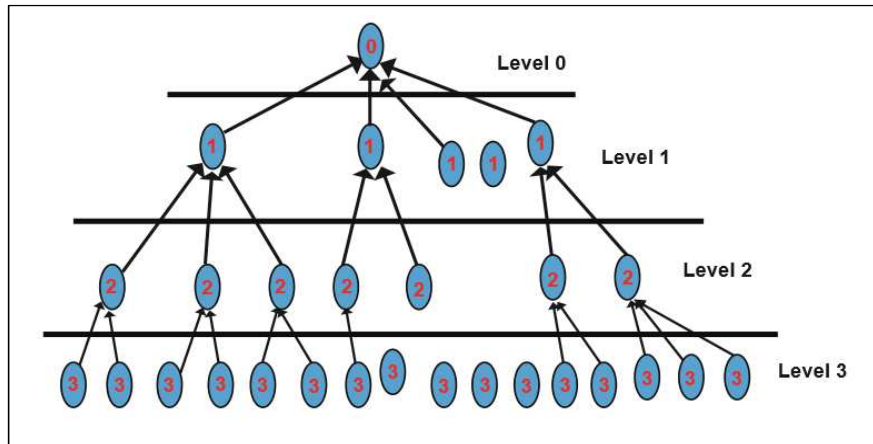


Figure 12: Parent node invalidation

Parent node invalidation: each node transmits the data after receiving the data request packet to from its parent node. If any node does not receive the data request from the long time (approximately 2 times slot), it deletes the father node from its list as shown in figure 12. And send the join request packet. And re-join the tree.

Step 12, handling the energy constrains: There are two possible values of the energy level of the node.

- A node with an energy level higher than half of the original battery capacity.
- A node with an energy level lower than half of the original battery capacity but higher than the average energy level.

** If the node energy level is lower than half of the original battery but higher than the average energy level (threshold value) then move the node one level lower and increase the level count by 1.

** If the leaf node has the energy higher than the battery capacity then move this node one level above and decrease the level count by 1.

(e) Comparison of ZigBee with other Technologies

ZigBee has some competing Technologies. They are: Z-wave, Insteon, Waveins, Bluetooth and Wi-fi.

Technology Features	ZigBee	Z-wave	Bluetooth	Waveins	WiFi	Insteon
Frequency	868 MHz 915 MHz 2.4 GHz	868MHz 908 MHz 2.4 GHz	2.4GHz	433MHz 868 MHz 915 MHz	2.4GHz 5 GHz	904MHz
Modulation	BPSK O-QPSK	FSK/GFSK	FHSS	GFSK/PSK	QPSK COFDM QAM	FSK
Error Control	CRC (16-bit)	CRC (8-bit)	CRC (16-bit)	BCH	CRC (32-bit)	CHECKS UM
Range	10m-100m	30m-100m	10m	200m-1000m	100m	45m
Network Size	64000	232	8	unknown	2007	256
Power Consumption	Very Low	Low power	Medium	Ultra-low	High	NA

Table 1: Comparisons of ZigBee with similar Technologies [19]

2. Result and analysis

According to equations (1) and (2) from AODVjr and tree based routing protocol, we made a new model to find the best path or way (short distance) to send data, having good performance and long lifetime in WSN. We remind that ZigBee protocol is a combination of AODV and tree based routing protocol and it uses mesh and star topologies. Our new approach consists to select node by calculating distance between coordinator and nodes, and node to node and modifies the network topology and communication inside ZigBee protocol. The following pictures show the difference between the olds architectures figure 13 and figure 14 from tree and mesh, and new designs of them we propose in figure 15 and figure 16 with a new approach of communication node to node and node to parent node.

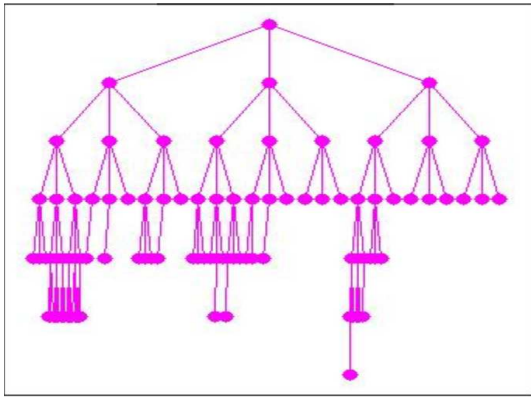


Figure 13: Tree topology

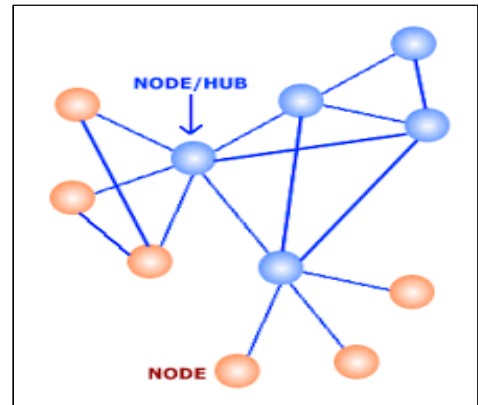


Figure 14: Mesh topology

As we said previously, our new approach and methodology permit to improve star topology and mesh with best path or way for communication to get a best lifetime of WSN. Figure 15 and figure 16 show us the change as bellow.

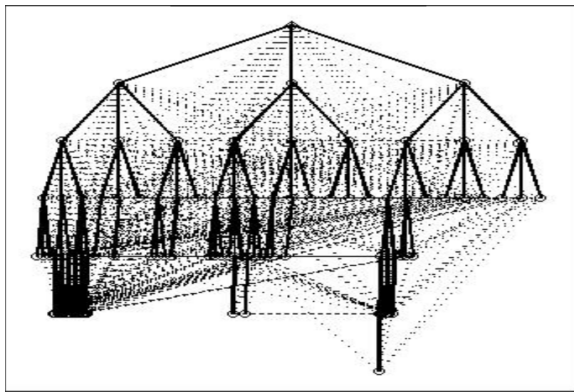


Figure 15: New Tree topology

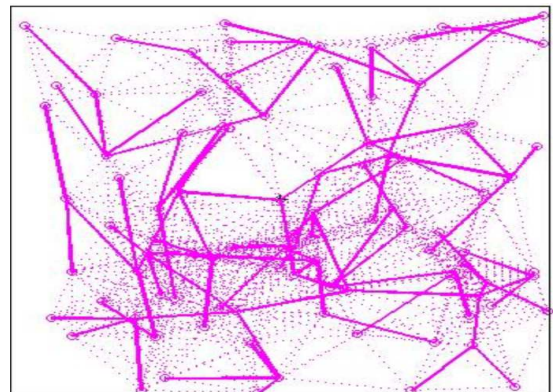


Figure 16: New Mesh topology

To possibly have those new topologies possible, we use in our simulation according to MATLAB:

Number of node: 100

Maximum Level: 6

Number of child by parent node: 3

We take some few lines from our program to explain some few methods we use to improve those topologies. For example, from line 41 to 43 we define address child node (refer Annex).

In the same program, we calculated the distance (short distance) between neighbouring nodes, and their energy according the maximum distance the node can be reachable from line 122 to 152 (refer to Annex).

At the other part of the program, we create parent node and child node from line 180 to 203 with different levels (refer to Annex).

Finally, when we compile the full program, we get new design of topologies (and new method of communication) with more data send according to the short distance between nodes and their energies. In the following graphics figure 17 and figure 18, we can see the good result with those new approaches.

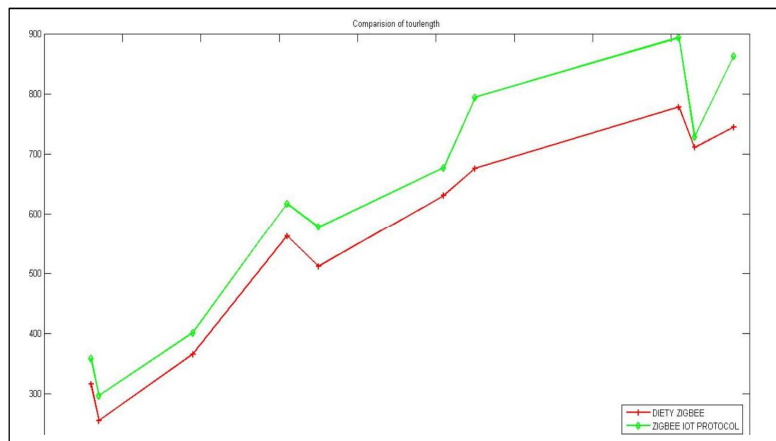


Figure 17: Comparison of tourlength between ZigBee DIETY and Zigbee IOT protocol

The fig. 17 shows that for the same data to send, ZigBee protocol made more tourlength and waste more energy, but our new approach does less. And this permits nodes to keep more energy and get alive after many rounds, so that to improve network lifetime in WSN figure 18.

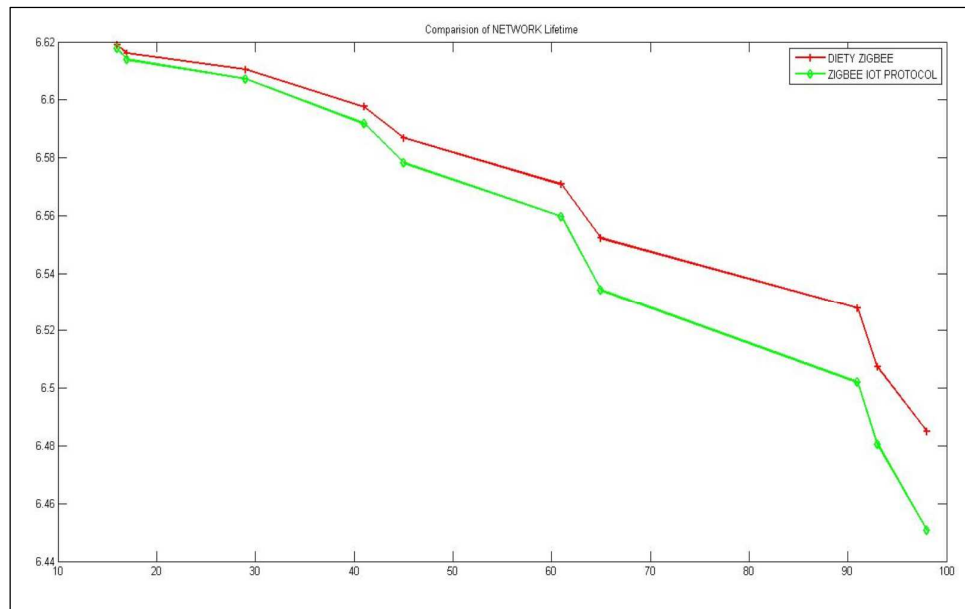


Figure 18: Comparison of lifetime ZigBee DIETZ and ZigBee IOT protocol

What we see in the figure 18 is the logic suite of nodes keeping more energy. In Zigbee IOT protocol nodes died quickly than our new approach Zigbee DIETZ by conserving more energy, and the method or process of short distance, node send to data to its neighbour which can receive and send it again to its neighbour with the same process and so on.

3. Conclusion

Our new approach ZigBee DIETZ permits to improve ZigBee IOT protocol. This optimizes send data and changes the classical method of transmission inside Wireless Sensor Network used by ZigBee. More improvement can be done with ZigBee because it uses many topologies and algorithms. What we did, it's to perform some topologies inside Zigbee IOT protocol like the amelioration of Tree topology and Mesh topology.

Annex page

```

41 - for i=0: Lm
42 -     cSkip(i+1) = (Cm^(Lm-i+1)-1)/(Cm-1);
43 - end

```

```

122 - for i = 1: maxn
123 -     k=0;
124 -     for j = 1: maxn
125 -         if i == j
126 -             continue;
127 -         end
128 -         %%
129 -         DISTANCE=sqrt((info(j,2)-info(i,2))^2+(info(j,3)-info(i,3))^2);
130 -         DISTANCE;
131 -         if (DISTANCE>dol)
132 -             S(i).E=S(i).E- ( (ETX+EDA)*(4000) + Emp*4000*( DISTANCE*DISTANCE*DISTANCE*DISTANCE ));
133 -
134 -         end
135 -         if (DISTANCE<=dol)
136 -             S(i).E=S(i).E- ( (ETX+EDA)*(4000) + Efs*4000*( DISTANCE * DISTANCE ));
137 -
138 -         end
139 -         %%
140 -         if (sqrt((info(j,2)-info(i,2))^2+(info(j,3)-info(i,3))^2) > tranRange) % j is out of range
141 -             if (sqrt((info(j,2)-info(i,2))^2+(info(j,3)-info(i,3))^2) <= tranRange)
142 -                 neighbor2(i, 1) = neighbor2(i, 1) + 1;
143 -                 neighbor2(i, neighbor2(i, 1) + 1) = j;
144 -             end
145 -             continue;
146 -         else
147 -             k = k + 1;
148 -             neighbor(i, k) = j;
149 -         end
150 -     end
151 -     info(i, 5) = k;
152 - end

```

```

180 - for i = 1 : Lm
181 -     txstep(i + 1) = txstep(i) / Cm;
182 - end
183 - tx(1) = tmaxX / 2;
184 - ty(1) = 5;
185 - for i = 2 : maxn
186 -     if tx(i) <= 0
187 -         parent = tneighbor(i, 1);
188 -         if tx(parent) <= 0
189 -             continue;
190 -         else
191 -             [level, child] = NODEblevel(Cm, Lm, info(i, 1));
192 -             tx(i) = tx(parent) - txstep(level-1+1) / 2 + txstep(level+1) / 2 + (child-1) * txstep(level+1);
193 -             ty(i) = 5 + tystep * level;
194 -             if info(i, 4) > 0
195 -                 for j = 1 : info(i, 4)
196 -                     k = tneighbor(i, j + 1);
197 -                     tx(k) = tx(i) - txstep(level+1) / 2 + txstep(level+1+1) / 2 + (j-1) * txstep (level+1+1);
198 -                     ty(k) = 5 + tystep * (level + 1);
199 -                 end
200 -             end
201 -         end
202 -     end
203 - end

```

Reference

[1] - Wissan Razouk et al. “new Security approach for ZigBee weakness” Procedia Computer Science 37/2014/376-381

- [2] – Amjad Gawanmeh, “Embedding and verification of ZigBee protocol stack in Event-B”, *Procedia Computer Science* 5/2011/736-741
- [3] – IEEE, IEEE-SA Standards Board, IEEE 802.15.4-2006 standard for WPAN, <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.2.15.4-2006.html>
- [4] – Chen C, “ZigBee smart energy product, Colorado: webcom communication corp”, August 31, 2015: P 15-16/
http://www.nxtbook.com/nxtbooks/webcom/zigbee_rg2015.
- [5] – Acharna R. and Dr L. G Malik, “ZigBee: The emerging technology in building automation”, *International Journal of Computer Science and Engineering (IJCSE)*, vol. 3, No 4, April 2011, P 149-148
- [6] – Naven Sastry and David Wagner, “Security considerations for IEEE 802.15.4 networks” In proceeding of the 3rd ACM workshop on wireless security, P 32-42 ACM 2004
- [7]– Dai Chengbin, “Research of ZigBee low energy consumption and high reliability” Guandong university of technology, 2014
- [8]– shantanu K. et al., “Investigation and performance analysis of some implemented features of the ZigBee protocol and IEEE MAC specification, American international university (AUIB), Bangladesh, <https://doi.org/10.3991/ijoe-vol.13/No1/2017>
- [9]– Zefeng Yi et al., “ZigBee technology application in wireless communication mesh network of ice disaster”, *Procedia Computer Science* 52/2015/1206-1217
- [10] – Pang Na, “Research of ZigBee mesh network for wireless sensors”, Jilin university/2010
- [11]– Manpreet, Jyoteesh M., “Simulation analysis of tree and mesh topologies in ZigBee network”, *International Journal of Grid distribution computing*, Vol. 8/ No 1/ 2015/P 81-82/ <https://doi.org/10.14257/ijgdc.2015.8.1.08>
- [12]– Md. Mamunur Rashid and Rethwan Faiz. “ZigBee: Simulation and investigation of star and mesh topology by using different transmission bands”, the AIUB Journal of Science and Engineering (AJSE). Vol. 14/No 1/August 2015/P 115-121
- [13]– Kalai Vani T, Allirani A, Priya, “ A survey on ZigBee based wireless sensor networks in agriculture”, 3rd international conference on trendz in information science & computing (TISC 2011), December 2011, <https://doi.org/10.1109/tisc.2011.6169090>

- [14]– Nahla Abdulrahman H., Fuad Ali Y., “Performance evaluation of ZigBee routing protocol under using OPNET modular”, International Journal of Computer Applications (0975-8887), Vol. 117, No. 18 May 2015, P 25-31
- [15]– Zhang Ling C., “Monitoring system design of substation environments based on ZigBee technology”, Heilongjiang: Harbin university of science and technology, 2014
- [16]– Liu Chengyin, Liu Wei, He Kai, “On-line comprehensive monitoring application for power transmission line based on GPRS and ZigBee technology”, Journal of Heilongjiang institute of science & technology 2012: 22:4: P 437-441
- [17]– Liu Xiaohua, Peng Yong, “Research on improved ZigBee mesh network routing algorithm”, Computer engineering 2014:40:8-96-100
- [18]– Mrityunjay Singh et al., “A tree based routing protocol for mobile sensor network”, International Journal on computer science and engineering (IJCSSE), Vol. 02, No 15, 2010, P 55-60
- [19]– Thoraya Obaid, et al., “ZigBee technology and its application in wireless home automation system: A survey”, International Journal of Computer Networks and Communication, Vol. 6, No 4, July 2014, P 115-131.
<https://doi.org/10.5121/ijcnc.2014.6411>

ANNEXE C : AUTRES CONTRIBUTIONS

➤ **Article 3 (indexé par SCOPUS, IF=0.5)**

Gbegbe, R., Asseu, O., Ali, K. E., Diety, G.L. and Hamouda, S. (2017), *Call admission control algorithm for energy saving in 5G H-CRAN networks*". Asian Journal of Applied Sciences

<http://scialert.net/qredirect.php?doi=ajaps.000087652&linkid=pdf>

➤ **Article 4 : (indexé par EBSCO ,IF=0.7)**

Gbegbe, R., Hamouda, S. and Diety, G.L. (2017)), *“Energy-based RRH assignment scheme for Heterogeneous Cloud Radio Access Networks”*". International Journal of Computer Applications

ISSN 1996-3343

Asian Journal of
Applied
Sciences



Research Article

Call Admission Control Algorithm for Energy Saving in 5G H-CRAN Networks

²Raymond Gbegbe, ^{1,2}Olivier Asseu, ²K. Eugene Ali, ²Guy L. Diety and ³Soumaya Hamouda

¹Ecole Supérieure Africaine des Technologies d'Information et de Communication (ESATIC), Abidjan, Côte d'Ivoire

²Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB), Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

³Ecole Supérieure des Communications de Tunis (Sup'Com Tunis), Tunis, Tunisie

Abstract

Objective: This study proposed a call admission control (CAC) algorithm focused on the remote radio heads (RRHs) in order to further reduce the power consumed by the H-CRAN by switching into sleep mode, the under-used RRHs. **Methodology:** Heterogeneous-Cloud Radio Access Networks (H-CRAN) were considered by many experts as a key technology that can meet the challenges in terms of throughput, power reduction and latency of 5G networks. It was an architecture that combines the advantages of heterogeneous networks (HetNets) and C-RAN networks. It was, therefore, rightly considered as a promising solution for increasing the spectral efficiency and energy efficiency of 5G networks. **Results:** It was performed that simulations of algorithm into two contexts depending on the cell radius: In the context 1, the radius is 1 km and 0.5 km in the second context. The simulations show that, more the radius is lower, more the algorithm reduced the power consumption with rates between 61 and 77% and then multiplied the energy efficiency by a ratio of 3. **Conclusion:** C-RAN networks offered the advantage of energy reduction and BBU can manage many RRHs. The future research will test this algorithm in a context where the UEs are in mobility situations and taking into account the effect of interferences.

Key words: 5G, H-CRAN, remote radio heads, call admission control, heterogeneous networks, sleep mode

Citation: Raymond Gbegbe, Olivier Asseu, K. Eugene Ali, Guy L. Diety and Soumaya Hamouda, 2017. Call admission control algorithm for energy saving in 5G H-CRAN networks. *Asian J. Applied Sci.*, 10: 179-185.

Corresponding Author: Olivier Asseu, Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB), Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

Copyright: © 2017 Raymond Gbegbe *et al.* This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution License, which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interest: The authors have declared that no competing interest exists.

Data Availability: All relevant data are within the paper and its supporting information files.

INTRODUCTION

In recent years, the IP traffic has grown exponentially. To provide a level of QoS satisfying their customers, the current mobile operators are expanding their radio access network. But this expansion increases the operating and maintenance costs (OPEX, CAPEX) and energy consumption. The next generation mobile network, the 5G planned to be launch in 2020, was expected to deliver data rates of 10-100 times compared to the 4G network and an energy consumption reduction around 90%^{1,2}. Several recent studies have shown that the heterogeneous C-RAN (H-CRAN) could be the architecture to meet the challenges and to enhance the performance of 5G³⁻⁵. It was a combined architecture of HetNet network and C-RAN network. HetNets consist of integrating many low power nodes (LPNs) or small cells (micro, pico or femto cells) inside macro-cells or HPNs (high power nodes). This increases network coverage and user throughput. As for C-RAN, it was a centralized architecture in which the part responsible for the baseband processing and was separated from the part responsible for basic radiofrequency processing of the base stations (BS)⁵. The baseband processing was performed by BBUs (base band unit) which were located together on a centralized site called BBU Pool, to better manage resource allocation and interferences mitigation. The radio frequency processing was done by remote radio heads (RRH: remote radio head). Beyond efficient resource management, the centralization of BBUs can reduce the energy costs of air conditioning⁴.

In H-CRANs the macro BS (MBS or M-RRH) is responsible for signalling control, while the RRHs are responsible for the transmission of high-speed data to the users. Several studies in the industrial and academic domains are working to optimize the use of spectrum and energy in H-CRANs. Among these works could cite the so-called "clustering" techniques which aim to determine the best BBU-RRH association in order to minimize the number of RRHs allocated to a data stream or to maximize the number of RRHs by BBU⁶⁻⁸. By reducing the number of active BBUs or RRHs, clustering mechanisms reduce the energy consumption of the system. On the other hand, some research's works focuses on methods of switching into sleep mode BBUs or RRHs to increase the energy efficiency⁹. For example, Zuo *et al.*¹⁰ study a joint mechanism for RRHs activation, a best UE-RRH association and resources allocation to maximize energy efficiency H-CRANs. Other studies focused on algorithms whose aim was to minimize

both the total power consumed and the number of switching of ON/OFF modes in a H-CRAN network with QoS guarantee^{11,12}.

This article uses an algorithm in order to minimize the total power consumption in the H-CRAN. The principle was to switch in sleep mode, the RRHs which are underused, that is to say the RRHs whose total power emitted was below a certain threshold of power. The UEs associated with these RRHs will then be reallocated to the other RRHs that are not saturated and underused. The simulations were carried out in 2 contexts: In the first one it was considered a macro cell of radius of 1 km and in the 2nd the radius of the cell is 0.5 km. It was then analyzed the evolution of the total power consumed by the network as a function of the number of RRHs in the cell.

MATERIALS AND METHODS

This research project, conducted in the Laboratory of Applied Electrical and Electronic (INPHB Yamoussoukro, Côte d'Ivoire) from May, 2016-June, 2017 by a theoretical study, has been confirmed by simulations results on a system model of an H-CRAN network.

System model: This system model is an H-CRAN network consisting of a set of BBUs located in a BBU Pool and macro cells within which macro RRH or HPN (high power node) and RRHs or LPNs (low power node) are available. Each macro cell was composed of a macro BS or macro RRH responsible for signalling and a set of micro, pico or femto RRHs that are responsible for the transmission of user data. The RRHs are randomly distributed inside the macro cell. The macro BS macro can also transmit useful data when the RRHs are saturated.

The following sections, focus only on the power consumed by the set of RRHs of a single macro cell as illustrated in Fig. 1. From now, it was assumed that the latency induced by the fronthaul network is null.

Energy model of base stations: It was assumed that the macro cell was composed of a number M of RRHs: A macro BS or macro RRH and $(M-1)$ RRHs of the "small cell" type. The variables P_{MBS} or P_{M_RRH} are defined as the power consumed by the macro BS or M-RRH and P_{RRHm} defined the power consumed by the RRH number m of the microcell. The binary variables β_m and λ are defined, respectively as the RRH _{m} activation variable and the macro BS activation variable, that means that:

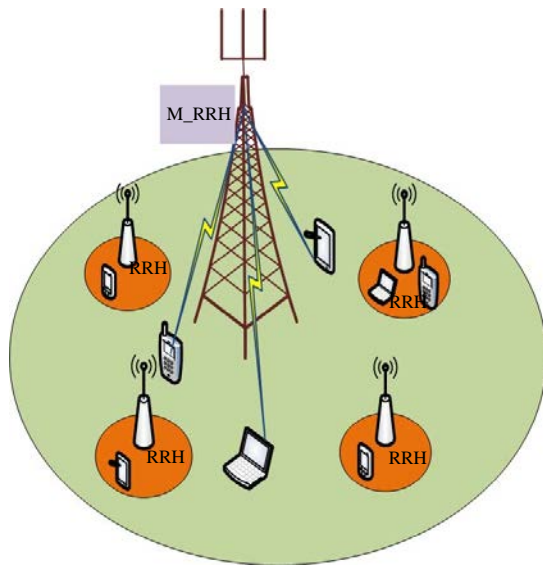


Fig. 1: H-CRAN Architecture

$$\beta_m = \begin{cases} 1 & \text{if the RRH}_m \text{ is ON} \\ 0 & \text{if the RRH}_m \text{ is OFF} \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda = \begin{cases} 1 & \text{if the RRH}_m \text{ is ON} \\ 0 & \text{if the RRH}_m \text{ is OFF} \end{cases} \quad (2)$$

In a similar way for UE_k association with a BS the binary variable a_{mk} is equal to 1 when the UE_k was served by the RRH_m and 0 otherwise. At the end b_k is the binary variable indicating the attachment of the UE_k to the macro BS.

The power consumption of the RRH_m in the macro cell is modeled as below:

$$P_{RRH,m} = \begin{cases} P_m + P_{CC,m} & \text{if the RRH}_m \text{ is active} \\ P_{0,stat} & \text{if the RRH}_m \text{ is in sleep mode} \end{cases} \quad (3)$$

where, $P_{CC,m}$ is the static power of RRH_m when it was active and P_m is the sum of the powers supplied to the UEs served by the RRH_m:

$$P_m = \sum_{k=1}^K a_{mk} P_{mk}$$

P_{mk} is the power transmitted by the RRH_m to the UE_k. It is thus deduced that:

$$P_{RRH,m} = \beta_m \left(P_{CC,m} + \sum_{k=1}^K a_{mk} P_{mk} \right) + (1 - \beta_m) P_{0,stat} \quad (4)$$

Similarly, the energy consumption model of the macro MBS or M_{RRHm} can be defined as follows:

$$P_{MBS} = \begin{cases} P_{MBS} + P_{CC,BS} & \text{if the MBS is active} \\ P_{BS,stat} & \text{if the MBS is in sleep mode} \end{cases} \quad (5)$$

With $P_{CC,MBS}$ the static power of the MBS when it was active and P_{MBS} is the sum of the powers supplied to the UEs served by the MBS:

$$P_{MBS} = \sum_{k=1}^K b_k P_{BS,k}$$

$P_{MBS,k}$ define transmitted by the MBS to the UE_k. Therefore, the power consumed by the MBS can be defined as follows:

$$P_{MBS} = \lambda \left(P_{CC,MBS} + \sum_{k=1}^K b_k P_{MBS,k} \right) + (1 - \lambda) P_{MBS,stat} \quad (6)$$

For each macro cell, the total power consumed is therefore:

$$P_T = P_{MBS} + \sum_{m=1}^{M-1} P_{RRH,m} = P_{M,RRH} + \sum_{m=1}^{M-1} P_{RRH,m} \quad (7)$$

Problem formulation:

$$PT = \lambda \left(P_{CC,MBS} + \sum_{k=1}^K b_k P_{M,RRH,k} \right) + \sum_{m=1}^{M-1} \beta_m \left(P_{CC,m} + \sum_{k=1}^K a_{mk} P_{mk} \right) \quad (8)$$

Minimize

Under constraints:

$$\sum_{k=1}^K a_{mk} P_{mk} \leq P_{RRH,max}, \forall m < M$$

$$\sum_{k=1}^K a_{mk} P_{mk} \geq P_{RRH,seuil}, \forall m < M$$

$$\sum_{k=1}^K b_k P_{MBS,k} \leq P_{MBS,max}$$

$$\sum_{k=1}^K b_k P_{MBS,k} \geq P_{MBS,seuil}$$

Calculation of the required power of an RRH to guarantee

the user bit rate: In this study scenario, it was assumed that each UE receives the minimum bit rate satisfying its QoS. According to Shannon's formula:

Table 1: Simulation parameters and their meaning

Parameters	Meaning	Values
M	Number of RRHs per macro cell	Variable
K	Number of UEs per macro cell	Variable
$P_{RRH-max}$	Maximum power of a small RRH	200 mw
$P_{MBS-max}$	Maximum power of a macro RRH	20 W
$P_{RRH-seuil}$	Minimum power threshold for a small RRH	$0 < \text{threshold} < 1$
$P_{MBS-seuil}$	Minimum power threshold for a macro RRH	$0 < \text{threshold} < 1$
P_{CC-m}	Constant power corresponding to the power consumed by the RRH circuits	$20\% P_{RRH-max}$
P_{CC-MBS}	Constant power corresponding to the power consumed by the macro RRH circuits	$20\% P_{MBS-max}$
N_0	Noise spectral density	-174 dbm/hz
L_{mk}	Path loss between the RRHm and the UEk	$130.62 + 37.6 \log_{10}(d_{mk})$ $d_{mk} = \text{distance (RRHm, UEk)}$
$R_{min,k}$	Minimum bit rate required by an EU for a service, assumed to be constant for all UEs	2 Mbps

$$R_{mk} = W_k \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_{mk} \cdot g_{mk}}{N_0 W_k + \sum_{i \neq m}^I P_{ik} \cdot g_{ik}} \right)$$

$$P_T = \lambda_{q_i} \left(P_{CC,MBS} + \sum_{k=1}^K b_{q_k} P_{M_{RRH},k} \right) + \sum_{m=1}^{M-1} \beta_m \left(P_{CC,m} + \sum_{k=1}^K a_{mk} P_{mk} \right) \quad (10)$$

with

- W_k = The band with of an UE_k,
- P_{mk} = Power transmit by RRHm to the UEk
- g_{mk} = The channel gain
- N = Noise spectral density
- $\sum_{i \neq m}^I P_{ik} \cdot g_{ik}$ = Co-channel interference
- I = The number of interfering stations

It is assumed that $W_k = W_{PRB} = 180 \text{ KhZ}$, the bandwidth of an OFDM resource block in LTE. Co-channel interference was neglected in this studies scenario. To guarantee the QoS must have:

$$R_{min,k} = W_{PRB} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_{mk} \cdot g_{mk}}{N_0 W_{PRB}} \right)$$

$$\frac{R_{min,k}}{W_{PRB}} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{mk} \cdot g_{mk}}{N_0 W_{PRB}} \right)$$

From this deduce that:

$$P_{mk} = \left(\frac{R_{min,k}}{2W_{PRB}} - 1 \right) \cdot \frac{N_0 W_{PRB}}{g_{mk}}$$

$$P_{mk} = \left(\frac{R_{min,k}}{2W_{PRB}} - 1 \right) \cdot N_0 W_{PRB} \cdot L_{mk} \quad (9)$$

where, $L_{mk} = 1/g_{mk}$ path loss between RRHm and UEk.

Formulation of the optimization problem:

Minimize:

Under constraints

$$\sum_{k=1}^K a_{mk} P_{mk} \leq P_{RRH-max}, \forall m < M$$

$$\sum_{k=1}^K a_{mk} P_{mk} \geq P_{RRH-seuil}, \forall m < M$$

$$\sum_{k=1}^K b_k P_{MBS,k} \leq P_{MBS-max}$$

$$\sum_{k=1}^K b_k P_{BS,k} \leq P_{MBS-seuil}$$

The power $P_{M_{RRH},k}$ is calculated in a similar way to (9):

$$P_{M_{RRH},k} = \left(\frac{P_{min,k}}{2W_{PRB}} - 1 \right) \cdot N_0 W_{PRB} \cdot L_{M_{RRH},k} \quad (11)$$

$L_{M_{RRH},k}$ = Path loss between the M_{RRH} and the UEk

According to this algorithm assumed that the consumption of a RRH in sleep mode is null:

$$P_{0,stat} = P_{BS,stat} = 0$$

Simulation parameters: In this simulation scenario, it was considered an H-CRAN architecture composed of a macro cell, consisting of M RRHs including a macro BS or macro RRH and (M-1) RRHs. The Table 1 below details the meaning of the simulation parameters and their values.

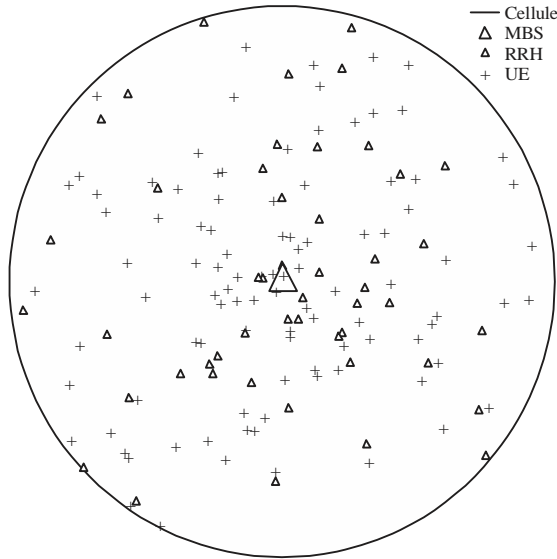


Fig. 2: Distribution of the UEs in the cell

Functions to be simulated: In this study the evolution of the total power consumed by the system as a function of the number of RRHs: $P_{TR} = f(\text{number_RRH})$.

It is assumed that the UEs are randomly distributed throughout the cell as shown in Fig. 2.

RESULTS AND DISCUSSION

Description of the algorithm: This study algorithm consists of 2 main functions:

F1: Allocation by standard CAC

F2: Allocation by CAC taking into account a power threshold

An RRH may be considered to designate a small RRH or the macro RRH.

F1 description:

- For each UE_k, calculate the power provided by each RRH (small or macro cell) present to reach the throughput which guarantees the QoS
- Sort the P_{mk} in ascending order, the first choice of the UE_k is the RRH which provides the lowest power and so on
- Assign UE_k to its first choice
- For each RRH calculate $P_{RRH} = \sum P_{UEk,1}$ where $P_{URk,1}$ is the power provided by the first choice RRH of UE_k
- As long as there is an RRH for which $P_{RRH} > P_{max}$ then, step A
- At the end of this loop, calculated $P_{F1tot} = \sum P_{RRH}$ which is the power consumed in a conventional CAC

F2 description:

- At the end of function F2, it was checked whether there were RRHs whose power was below a threshold power
- If $P_{RRH} < P_{threshold}$ for RRHs, then proceed to step B
- End of the algorithm when there was no more redirection: calculated the total power: $P_{F2tot} = \sum P_{RRH}$ always active, which corresponds to the power optimized by this algorithm,

Comparison of $P_{F1tot} = \sum P_{RRH}$ and $P_{F2tot} = \text{always active}$

Step A: Redirection of all the most costly UEs in terms of powers, for the RRH to their next choice until $P_{RRH} \leq P_{max}$, always making sure that each redirection have $P_{RRH_host} \leq P_{max}$, where P_{RRH_host} is the power of the host RRH

Step B: Redirection of all UEs served by the RRH to their next choice, making sure that during each redirection $P_{RRH_host} \leq P_{max}$ for the host RRH
The underused RRH (original RRH) was switched to sleep mode

Simulation results: This section presented the results of the simulations that were carried out according to the 2 contexts, in context 1, the radius of the cell is 1 km and in the context 2, the radius is fixed at 0.5 km. In each context, it was represented the evolution of the total power as a function of the number of RRHs: $P_{TR} = f(\text{number_RRH})$. In this program, the snapshots average was set at 500 in order to represent the function $P_{TR} = f(\text{number_RRH})$. It was assumed that the values of the simulation parameters were as follows: power threshold=0.5, K=150 UEs and each UE throughput was set at 2 Mbps.

Figure 3 shows that for a given number of UEs and a given power threshold the power $P_{TR} = f(\text{number_RRH})$ was substantially identical according to the 2 CAC algorithms in the context 1, up to 25 RRHs. When the number of RRHs varies between 25 and 55 CAC algorithm consumes slightly compared to the classic CAC. Between 65 and 105 RRHs this algorithm reduces the power consumed by a rate between 7.09 and 52%.

Moreover, in the context 2, the power $P_{TR} = f(\text{number_RRH})$ was always higher for the standard CAC compared to the CAC with threshold, especially when the number of RRH reaches 15, the power of the conventional CAC varies between 5.79 and 9.27 W. On the other hand, for the CAC with threshold, before 15 RRHs, this study algorithm consumes practically the same power as

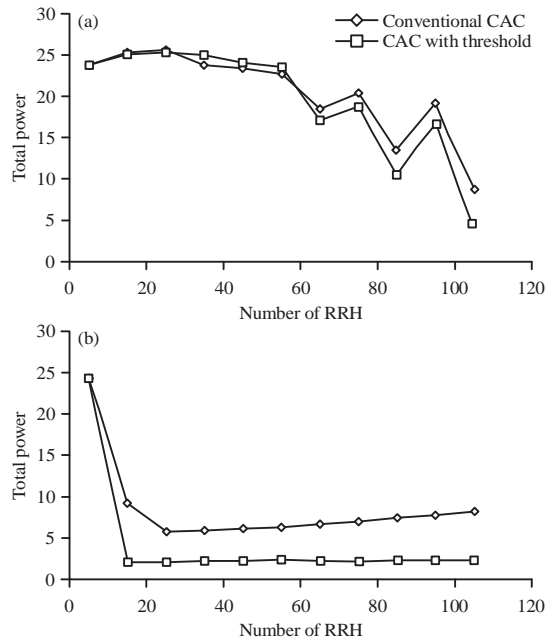


Fig. 3: The results of simulations

the conventional CAC, it can be seen from the Fig. 3 that for a number of 5 RRHs the powers consumed are substantially identical because all the resources are almost used.

From 15 RRHs, the power consumption varies between approximately 2.10 and 2.3 W. This represents a reduction rate varying between 61.57 and 77.32%. Therefore more the radius of the cell was lower, more the power consumed by the network decreases as just showed through algorithm. And in addition, for a small radius CAC algorithm with threshold, considerably reduces the power consumed by the system in comparison with conventional CAC in C-RAN network. For example Xu and Wang⁷ developed an algorithm in C-RAN network, which reduced the power consumed by a rate between 27 and 53%. That was the same observation for the study of Zhao *et al.*¹³. This therefore proved that this study algorithm improves the energy efficiency: it can be seen that from 15 RRHs the EE is multiplied on average by 3. It was quite normal, when the number of resources increases for a fixed number of UEs, the number of under-utilized RRHs increases. Therefore, this algorithm could pause a higher number of RRHs. Moreover, the secondary choices (RRHs) of the UEs which were redirected are more likely to be close to the UEs, radiating powers with low powers since in context 2, the density of RRHs km^{-2} is multiplied by 4 compared to the context 1.

CONCLUSION

This study was proposed to design call admission control (CAC) algorithm to reduce power consumption in a 5G H-CRAN network. In this study defined an algorithm that switches in sleep mode all RRHs whose radiated power is below a power threshold that we have set and then analyzed the evolution of the total power in two cell-dependent contexts with a random distribution throughout the cell. Context 2 multiplies averagely EE by 3 and reduces the power between 61 and 73%. So, when the cell radius is lower and more the EE increases in general, but even more with our CAC algorithm.

In the future research will test this algorithm in a context where the UEs are in mobility situations and taking into account the effect of interferences.

SIGNIFICANCE STATEMENTS

This study proposed for the first time a call admission control (CAC) algorithm that is focused on the radio remote heads (RRHs). C-RAN networks offer the advantage of energy reduction, since a BBU can manage many RRHs.

REFERENCES

- Peng, M., Y. Yu, H.u Xiang and H.V. Poor, 2016. Energy-efficient resource allocation optimization for multimedia heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE Trans. Multimed.*, 18: 879-892.
- Peng, M., Y. Li, J. Jiang, J. Li and C. Wang, 2014. Heterogeneous cloud radio access networks: A new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies. *IEEE Wireless Commun.*, 21: 126-135.
- Peng, M., Y. Li, Z. Zhao and C. Wang, 2015. System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE Network*, 29: 6-14.
- Kullin, C. and D. Ran, 2011. C-ran the road towards green ran. China Mobile Research Institute, White Paper.
- Namba, S., T. Warabino and S. Kaneko, 2012. BBU-RRH switching schemes for centralized RAN. Proceedings of the 7th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM), Kun Ming, China, August 8-10, 2012, IEEE, New York, USA., pp: 762-766.
- Boulos, K., M. El Helou and S. Lahoud, 2015. RRH clustering in cloud radio access networks. Proceedings of the International Conference on Applied Research in Computer Science and Engineering, October 8-9, 2015, Beirut, Lebanon, pp: 1-6.

7. Xu, S. and S. Wang, 2016. Efficient algorithm for baseband unit pool planning in cloud radio access networks. Proceedings of the IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing, China, May, 15-18, 2016, IEEE, New York, USA., pp: 1-5.
8. Lee, Y.L., L.C. Wang, T.C. Chuah and J. Loo, 2016. Joint resource allocation and user association for heterogeneous cloud radio access networks. Proceedings of the 28th International Teletraffic Congress, Wurzburg, Germany, September 12-16, 2016, IEEE., New York, USA., pp: 83-93.
9. Dolfi, M., S. Morosi, C. Cavdar and E. Del Re, 2017. Energy efficient optimization of a sleep mode strategy in heterogeneous cellular networks. Proceedings of the European Conference on Networks and Communications, Oulu, Finland, June 12-15, 2017, IEEE., New York, USA., pp: 1-6.
10. Zuo, J., J. Zhang, C. Yuen, W. Jiang and W. Luo, 2016. Energy efficient user association for cloud radio access networks. IEEE Access, 4: 2429-2438.
11. Dai, Y., S. Jin, L. Pan, X. Gao, L. Jiang and M. Lei, 2015. Interference control based on beamforming coordination for heterogeneous network with RRH deployment. IEEE Syst. J., 9: 58-64.
12. Khan, M., R.S. Alhumaima and H.S. Al-Raweshidy, 2015. Reducing energy consumption by dynamic resource allocation in C-RAN. Proceedings of the European Conference on Networks and Communications, Paris, France, June 29-July 2, 2015, IEEE., New York, USA., pp: 169-174.
13. Zhao, T., J. Wu, S. Zhou and Z. Niu, 2014. Energy-delay tradeoffs of virtual base stations with a computational-resource-aware energy consumption model. Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), Macau, China, November 19-21, 2014, IEEE., New York, USA., pp: 26-30.

Energy-based RRH assignment scheme for Heterogeneous Cloud Radio Access Networks

Raymond Gbegbe
INPHB, Yamoussoukro
Cote d'Ivoire

Soumaya Hamouda
MEDIATRON Lab., Sup'Com
Tunisia

Guy Landry Diety
INPHB, Yamoussoukro
Côte d'Ivoire

ABSTRACT

One of the main concerns of the next fifth mobile radio generation (5G) is increasing the network radio capacity while reducing system power consumption. Cloud-Radio Access Network (CRAN) coupled with Heterogeneous Networks (HetNets), called H-CRAN, reveals a promising paradigm to solve this problem. By having one centralized Base Band Unit (BBU) pool, the transmit powers at the different Radio Remote Headers (RRHs) are indeed better controlled while meeting users' quality of service. More precisely, a coordinated power control at the H-CRAN's BBU pool helps activating the appropriate RRHs in the macrocell given the fact that coverage and radio capacity are ensured with the HetNet. In this paper, a practical solution to efficiently monitor the transmit power at the RRHs in an H-CRAN is proposed. Only the most requested RRHs and which ensure minimum total power consumption in the system are activated. Different scenarios are studied and simulation results showed that the total transmit power can be reduced by at least 58%.

General Terms

5G, CRAN, System architecture.

Keywords

CRAN, H-CRAN, RRH, Power control, Energy Efficiency

1. INTRODUCTION

To cope with the explosion of multimedia traffic demands in terms of data rates and the number of connected objects, current and future networks must face major technical challenges in order to increase their radio capacity. Besides, operations pay more attention to the Capital Expenditure (CAPEX) and Operating Expenses (OPEX) nowadays. Numerous studies have shown that Heterogeneous Networks (HetNets) networks and Cloud Radio Access Network (C-RAN) are promising solutions to these challenges and above all they improve the Spectral Efficiency (SE) as well as the Energy Efficiency (EE) of the systems [1,4]. The principle of the HetNets consists in integrating Low Power Nodes (LPNs) or small cells of micro, pico or femto types inside macrocells served by Macro-Base Stations (MBS) or High Power Node (HPN) [2,3,11]. This increases the capacity and coverage of the network because the frequency reuse distance is reduced. On the other hand, C-RAN is a centralized architecture in which the base station processing part of the different Base Stations (BSs) is separated from the radiofrequency processing subsystem [4]. The baseband processing is carried out by Base Band Units (BBUs) which are grouped together on a centralized site called BBU pool, whereas Radiofrequency processing is achieved at the Remote Radio Headers (RRHs). H-CRAN (Heterogeneous Cloud Access Network) is a new architecture resulting of coupling C-RAN

with HetNets. All BBUs of both macrocells and the corresponding small cells are gathered in one single BBU pool. The H-CRAN is considered by experts as a promising solution to meet the demand for broadband and energy reduction as advocated by 5G networks [2]. Through optimal BBU management, it can indeed better coordinate the transmit power in the network, mitigate the interference, increase the radio capacity and reduce system energy consumption while ensuring a total coverage in the network and meet users' quality of service requirements.

Recent research has identified mechanisms to optimize the SE and the EE in C-RANs. For example, some contributions have examined the clustering techniques to determine the best BBU-RRH association in order to minimize the number of RRHs allocated to a data stream without degrading the required QoS [5,7]. Other proposed clustering methods aim at maximizing the number of RRHs by BBU in [7]. Neighboring RRHs are assigned to the same BBU as long as the processing capacity limit is not reached [5,6]. By reducing the number of active BBUs or RRHs, all of these clustering mechanisms help reduce the power consumption in the system. In addition, other studies have focused on methods for putting the BBUs or RRHs on standby to increase the EE [12]. In [8], the authors proposed a joint mechanism for RRH activation and the radio resource allocation to maximize the EE in a H-CRAN, under the constraint of the fronthaul link capacity. The authors of [9,10] studied the mechanisms which minimizes both the total power consumed and the number of failures of standby/ active modes in a H-CRAN network with guaranteed QoS.

In this paper, a new algorithm which minimizes the total power consumed by the H-CRAN under quality of users' constraint is proposed. The basic idea is to identify the RRH which are underutilized, then switch them to standby mode and keep on the RRH which are the most requested and whose transmit power is higher than a certain threshold. The User Equipments (UEs) associated to the first RRHs' group, will then be reassigned to the RRHs which are not overloaded while respecting their quality of service and minimizing the total consumed power in the network. The threshold is indeed set such that the total consumed power is minimized while the user's throughput is reached.

The paper is organized as follows. Section 2 describes the system model and formulates the optimization problem. Section 3 gives more details about the proposed algorithm. Simulation results are presented and commented in Section 4. Finally, Section 5 concludes this paper.

2. SYSTEM MODEL AND PROBLEM FORMULATION

2.1 System layout

The considered system consists of an H-CRAN network architecture including a set of virtual BBUs grouped in a BBU pool connected to one macrocell and several small cells inside, and the corresponding RRHs which are responsible for the radio transmission (Fig. 1). The RRHs are randomly distributed inside the macrocell. It is also assumed that the end users can receive data from either the RRH of the small cells or the RRH of the macrocell (M-RRH) since the small cells are considered as working in open access mode. In addition, the BBU Pool is connected to all the base stations by a high-speed fiber optic link.

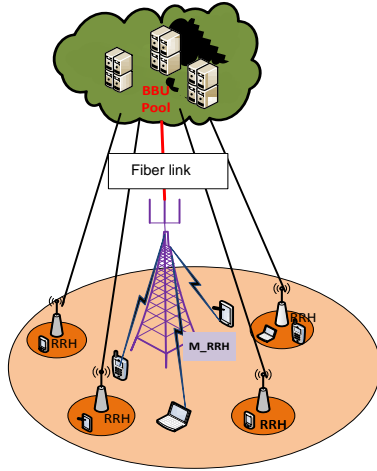


Fig. 1: System layout

2.2 Energy consumption model and problem formulation

Since the study's aim is minimizing the total consumed power at the RRH by properly activating the RRH and reassigning the UEs to these RRHs, here below is given the expression of the total consumed power at the fronthaul without considering the the Fiber Optic link power consumption.

Let K and M be the number of users and RRHs in the macrocell respectively. Denote α , β_m , a_k and $b_{m,k}$ the following binary parameters:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{if the M-RRH is active} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$\beta_m = \begin{cases} 1 & \text{if the RRH } m \text{ is active; } m = 1, \dots, M \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$a_k = \begin{cases} 1 & \text{if the user } k \text{ is served by the M-RRH; } k = 1, \dots, K \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$b_{m,k} = \begin{cases} 1 & \text{if the user } k \text{ is served by the RRH } m; k = 1, \dots, K \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

The total consumed power P_{M-RRH} at the M-RRH fronthaul is then expressed as follows:

$$P_{M-RRH} = \alpha \left(P_{cc,M-RRH} + \sum_{k=1}^K a_k P_k \right) + (1 - \alpha) P_{M-RRH, idle}$$

(5)

where:

- $P_{CC,M-RRH}$ is the consumed power at the circuits of the M-RRH when the latter is active.
- P_k is the required transmit power from the M-RRH to the user k to meet his QoS
- $P_{M-RRH, idle}$ is the consumed power at the circuits of the M-RRH when the latter is idle (i.e. not serving any user inside the macrocell)

Similarly, the total power consumed by the total RRHs inside the macrocell is given by:

$$P_m = \beta_m \left(P_{cc,m} + \sum_{k=1}^K b_{m,k} P_{m,k} \right) + (1 - \beta_m) P_{m, idle}$$

(6)

where:

- $P_{CC,m}$ is the consumed power at the circuits of the RRH when the latter is active.
- $P_{m,k}$ is the required transmit power from the serving RRH to the user k to meet his QoS
- $P_{m, idle}$ is the consumed power at the circuits of the RRH when the latter is idle (i.e. not serving any user around)

Consequently, the total power consumed on the fronthaul link is equal to:

$$P = P_{M-RRH} + \sum_{m=1}^M P_m \quad (7)$$

The problem formulation is therefore expressed as:

$$\min_{\alpha, \beta_m, a_k, b_{m,k}} P \quad (8)$$

subject to:

$$P_{M-RRH_Thres} \leq \sum_{k=1}^K a_k P_k \leq P_{M-RRH_max} \quad \text{if } \alpha = 1$$

and

$$P_{RRH_Thres} \leq \sum_{k=1}^K b_{m,k} P_{m,k} \leq P_{RRH_max} \quad \text{if } \beta_m = 1$$

where:

- P_{M-RRH_Thres} and P_{RRH_Thres} are certain total transmit power thresholds at the M-RRH and the different RRH respectively.
- P_{M-RRH_max} and P_{RRH_max} are the maximum transmit power at the M-RRH and the different RRH respectively.

3. PROPOSED ENERGY-BASED RRH ASSIGNMENT ALGORITHM

The proposed Energy-based RRH assignment scheme is a two-step algorithm. In the first step, a typical RRH assignment is applied where users are attached to the RRH presenting the lowest transmit power enabling them to meet their required QoS. In this step, all RRHs (including the M-RRH) are thus assumed to be active and serve the users with the lowest possible transmit power to ensure users' quality of

service. This phase corresponds to a common attachment scheme. However, it is not optimal in terms of energy consumption as some of the RRH (including the M-RRH) keep consuming circuit power even if the number of the attached users is small. The second step is thus introduced to take advantage of the H-CRAN architecture and better coordinate between the different RRH to optimize the energy consumption in the whole fronthaul link.

The second step basic idea is to switch users from the RRHs who are underutilized to more loaded RRHs while ensuring the quality of service to these users and guaranteeing that the total consumed power in the network is minimized.

More precisely, in the second step, first the RRHs (including M-RRH) whose the total consumed powers are under a certain threshold P_{RRH_Thresh} (or P_{M-RRH_Thresh}) are switched off. Then, the attached users of these RRHs are redirected to other RRHs according to the following: for each user, the active RRHs' transmit powers that ensure meet the required quality of service are sorted. Then, the user is assigned to the RRH that presents the lowest transmit power if this reassignment does not cause any exceed in the total transmit power of the RRH nor in the total consumed power in the network, otherwise, the user is assigned to the following ranked RRH verifying this condition. The algorithm ends when all users are reassigned to different RRHs. In order to ensure the feasibility of the algorithm, it is assumed that the whole network is not overloaded to be able to reassign all users. Indeed, the proposed algorithm only concerns networks which are not overloaded to save energy in those networks. In the opposite case (for networks overloaded), it is obvious that all RRHs should be activated to serve all users' demands.

Table I gives more details about the proposed energy-based RRH assignment scheme.

4. SIMULATION RESULTS

In this section, the performance of the proposed energy-based RRH assignment is evaluated in terms of total consumed power in the fronthall and compared these performances to those obtained with the common RRH assignment scheme which corresponds to the Step one of the algorithm. The impact of the number of users in the network which represents the system load, the number of the RRHs (or small cells) in the network and the consumed power threshold P_{Thres} is also examined.

The proposed scheme will be referred as E-RRH Assignment (Energy-based RRH) whereas the common scheme will be called C-RRH Assignment (Common RRH Assignment).

On the other hand, two scenarios are considered. In the first scenario, a uniform distribution of all users in the network is assumed, whereas in the second scenario, the users are gathered in hotspots. For a better illustration of the second scenario, the users are randomly distributed in one area of the macrocell. Fig. 2 illustrates an example of snapshots obtained in each scenario. The simulation results given hereafter are obtained by averaging the resulting performance metrics of 1000 snapshots. Some simulation parameters are details in Table II. Note that for a better illustration of the proposed Energy-based RRH assignment scheme, the powers P_{M-RRH_idle} and P_{m_idle} for all m are set to zero.

Table I. Proposed Energy-based RRH assignment scheme

Inputs: P_{M-RRH_Thres} and P_{RRH_Thres}
Outputs: α , β_m , a_k and $b_{m,k}$
First Phase:
1: Initialize $\alpha=1$ and $\beta_m=1$ for all m
2: Compute all p_k and $p_{m,k}$ for all m and k
3: For each k
4: Compute the transmit power p_k and $p_{m,k}$ to achieve the required user's throughput from the M-RRH and all RRHs
5: Sort p_k and $p_{m,k}$ for all m
6: Assign user k to the cell having the smallest p_k and $p_{m,k}$ //deduce the resulting a_k and $b_{m,k}$
7: End
Second Phase:
1: Compute P_{M-RRH} and P_m for all m
2: Sort P_{M-RRH} and P_m for all m
3: Identify k such that $P_{M-RRH} < P_{M-RRH_Thres}$ or $P_m < P_{RRH_Thres}$ // Set $\alpha = 0$ and $\beta_m = 0$ accordingly
4: Assign user k to the cell having the following smallest p_k and $p_{m,k}$ that //deduce the resulting a_k and $b_{m,k}$
5: Verify the conditions $P_{M-RRH} < P_{M-RRH_max}$ or $P_m < P_{RRH_max}$ otherwise go back to 4:
6: Repeat 3 and 4 until all users k are assigned

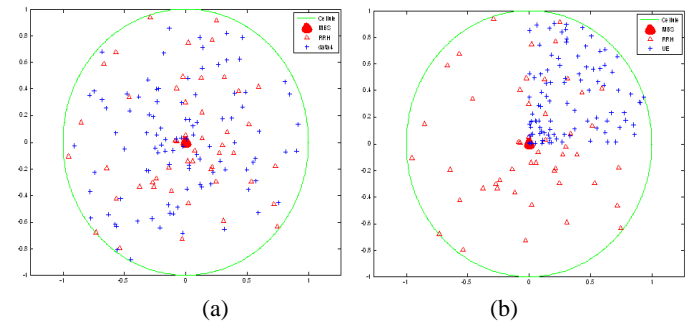


Fig. 2: (a) Scenario 1 with uniform user's distribution; (b) Scenario 2 with users distributed in a hotspot

Table II. Simulation Parameters

Parameter	Value
Maximum transmit power at the M-RRH P_{M-RRH_max} [W]	20
Maximum transmit power at the M-RRH P_{RRH_max} [mW]	200
Consumed power at the circuits of the M-RRH $P_{CC,M-RRH}$ [W]	4
Consumed power at the circuits of the RRH $P_{CC,m}$ [mW]	40
Minimum required users' throughput [Mbps]	2
Macrocell radius [km]	0.5
Noise power density	-174 dBm/Hz
Pathloss between a SU Tx and a SU Rx	$130.62 + 37.6 \log_{10}(d_{ss})$

4.1 Impact of the system load

Fig. 3 depicts the total consumed power vs. the number of users in the macrocell K for both scenarios with $P_{M-RRH_Thres}=0.5 P_{M-RRH_max}$, $P_{RRH_Thres}=0.5 P_{RRH_max}$ and $M=50$. It shows that in both scenarios, the power consumed increases with the number of UEs. However, the classical C-RRH Assignment scheme in scenario 1 consumes more power as compared to the scenario 2. In the first case this power varies from 6W (15 UE) to 7.1W (305UE). As for the proposed E-

RRH Assignment scheme, the total consumed power P in the system in the first scenario varies from 0.68W (15UEs) to 2.91W (305 UEs). In scenario 2 this power increases from 0.37W (15UEs) to 1.42 W (305) W.

This corresponds to a reduction in power consumption from 88.66% (15UEs) to 58.95% (305 EUs) for the scenario1 against 93.8% (15 EUs) to 77.24% for the scenario2 as shown in Fig. 4. In both scenarios, the proposed E-RRH Assignment scheme considerably reduces the consumed power in the system. This reduction is even more important in the scenario 2 where the UEs are concentrated in one area of the macrocell. In fact, when the UEs are concentrated in one zone of the cell, the primary and secondary choices of the UEs are the RRHs present in this zone. RRHs not in this area would transmit higher power and thus be less likely to be assigned to a UE; they will as a consequence be deactivated. The number of RRHs put on standby is higher in this case. The percentages of RRHs extinguished in scenario 2 confirms this, with a rate of extinguished RRHs decreasing from 93% to 83%, as compared to a rate that decreases from 88% to 68% in the scenario 1 (Fig. 5).

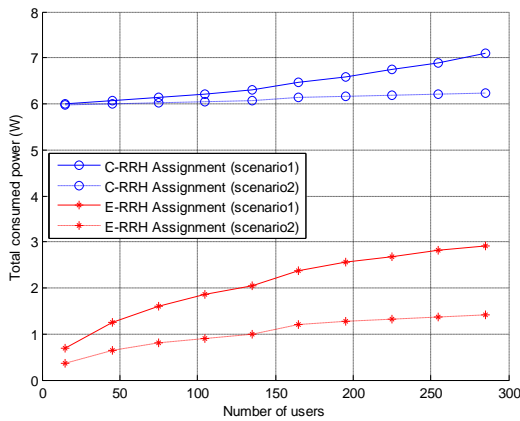


Fig. 3: Total consumed power in the system vs. the number of users for $P_{M-RRH_Thres} = 0.5 P_{M-RRH_max}$, $P_{RRH_Thres} = 0.5 P_{RRH_max}$ and $M = 50$.

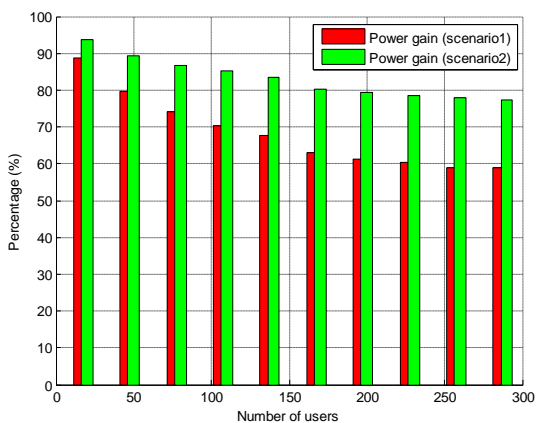


Fig. 4: Percentage of the power gain for the proposed E-RRH Assignment scheme vs. the number of users.

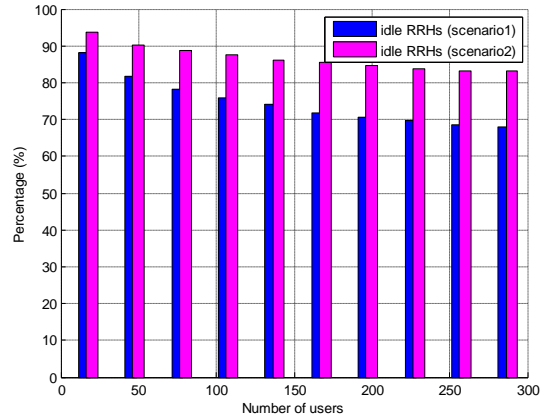


Fig. 5: Percentage of the idle RRHs for the proposed E-RRH Assignment scheme vs. the number of users.

4.2 Impact of the number of RRHs

Fig. 6 depicts the total consumed power vs. the number of RRHs in the macrocell M for both scenarios with a total number of users of $K = 150$ and $P_{M-RRH_Thres} = 0.5 P_{M-RRH_max}$, $P_{RRH_Thres} = 0.5 P_{RRH_max}$. The analysis of the two scenarios shows us that when there are fewer resources that is to say less than RRHs in the cell, the power consumed is high. In the first scenario, for both RRH assignment schemes $P = 24.46$ W when there are 5 RRHs in the network. In scenario 2, the total consumed power for both RRH assignment schemes is equal to $P = 24$ W. This means that regardless of the distribution of UEs in the cell, when there is less resource the powers transmitter, the total consumed power is almost identical for both assignment schemes. In fact, when there are fewer RRHs all resources are used, no RRH should be put on standby.

However, as the number of RRHs increases, the power consumed begins to fall sharply. In scenario 1 the power drops from 24.46 W to 15 W when the number of RRHs goes from 5 to 15 for the conventional C-RRH assignment scheme. As for the proposed E-RRH Assignment scheme, the power drops from 24.46 W to 9.93 W for the same variation in the number of RRHs. This corresponds to a reduction of 34% of the consumed power. When the number of RRHs reaches 25, the total consumed power drops to 2.26 W which implies a reduction of 72% thanks to the proposed E-RRH assignment scheme as compared to the conventional C-RRH assignment scheme. Beyond 25 RRHs, there is a total consumed power reduction between 65% and 74%. The total power consumed by the proposed E-RRH assignment scheme varies between 2 W and 2.36 W (Fig. 7). For the scenario 2, when the number of RRHs increases from 5 to 15 RRHs, the total consumed power drops from 24 W to 1.47 W. This corresponds to a reduction of about 93%. From 25 RRHs the power consumed by the proposed E-RRH assignment scheme varies between 1.16W and 1.65W. This corresponds to a reduction in consumed power that varies between 75.86% and 82.81%.

On the other hand, the proposed E-RRH assignment scheme significantly reduces the power consumed when the number of RRHs increases. This is due to the fact that with the increase of power transmitters (i.e. the RRHs), a high number of underutilized RRHs for the same system load (i.e. the same number of users in the system) is obtained. It is thus preferable to switch these inactive RRH using the proposed E-RRH assignment scheme.

Furthermore, as shown in Fig. 8, this reduction is higher in scenario 2, because when the number of RRHs increases, the concentration of the number of RRHs also increases in the hotspot where the UEs are concentrated. They are therefore closer to their first choices and their secondary choices. This reduces the power required at the RRHs in this area to meet their quality of service (i.e. the required throughputs). Moreover, this transmit power corresponds practically to the power consumed by the entire network. The other RRHs are also too far from the UE concentration area.

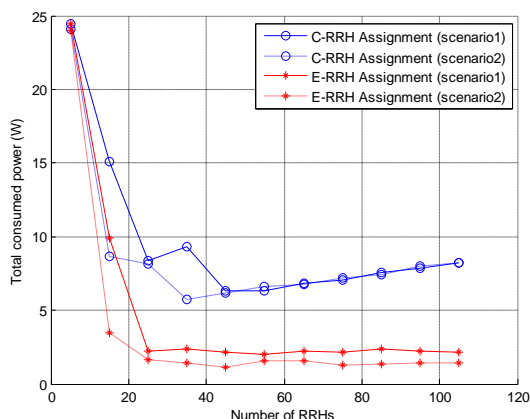


Fig. 6: Total consumed power in the system vs. the number of RRHs for $P_{M-RRH_Thres} = 0.5 P_{M-RRH_max}$, $P_{RRH_Thres} = 0.5 P_{RRH_max}$ and $K = 150$.

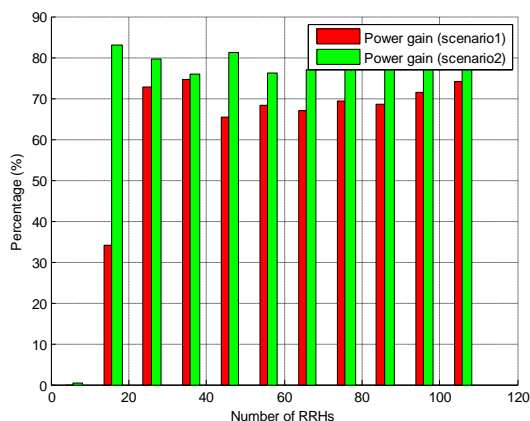


Fig. 7: Percentage of the power gain for the proposed RRH Assignment scheme vs. the number of RRHs.

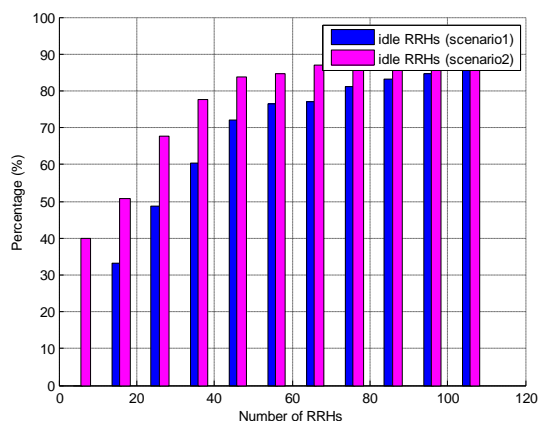


Fig. 8: Percentage of the idle RRHs for the proposed E-RRH Assignment scheme vs. the RRHs.

4.3 Impact of the consumed power threshold

Fig. 9 depicts the total consumed power vs. the threshold ratio (i.e. which corresponds to is the ratio of P_{M-RRH_max} to P_{M-RRH_Thres}) for both scenarios with a total number of users in the macrocell of $K = 150$ and a total number of RRHs equal to $M = 50$. It shows that in both scenarios, the proposed E-RRH assignment scheme reduces the total consumed power in both scenarios. In both cases, the power consumed is constant regardless of the power threshold for the conventional C-RRH assignment scheme. It is equal to 6.33 W in the scenario 1 and to 6.1 W in the scéanrio2. This steadiness is due to the fact that this scheme only depends on the number of UEs and the RRHs in the network which are constant in this simulation. Each UE is normally associated with its first choice of RRHs to meet the required quality of service.

On the other hand, when the proposed E-RRH assignment scheme is applied in scenario 1 where the UEs are uniformly distributed throughout the cell, there is a notable reduction in the power consumption. This power increases by 1.63W (threshold ratio=0.1) to reach 2.13W (threshold ratio = 0.5W). Then, it slightly decreases to reach 1.83 W (threshold ratio=0.8). The proposed E-RRH assignment scheme achieves a reduction of total consumed power between 66.37% (threshold ratio = 0.5) and 74.22% (threshold ratio = 0.1) as shown in Fig. 10, and switches into "sleep mode" (or idle mode) between 71.43% (threshold ratio = 0.1) and 75% (threshold ratio = 0.3) of the RRHs as shown if Fig. 11. For a lower threshold ratio, the rate of extinguished RRHs is lower, because in this case there are more RRHs whose transmit powers exceed the maximum allowed transmit power. As the threshold ratio increases, the number of RRHs extinguished increases because the number of RRHs satisfying the condition decreases. So the number of UEs redirected to their secondary choices increases. The transmit power of the former assigned RRHs increases in return. This could explain the slight increase despite the fact that the number of RRHs extinguished increases with the value of the threshold ratio.

In scenario 2, i.e. when the UEs are grouped in one area of the macrocell, one can note that with the proposed E-RRH assignment scheme, the total consumed power is lower as compared to the scenario 1. It varies between 0.72 W (threshold ratio = 0.1) and stabilizes around 1 W from a threshold ratio of 0.4. It is also observed that the total consumed power decreases when the threshold ratio increases (from 88% to 82%). This means that there are fewer RRHs that meet the condition, the same in the scenario 1. However, contrary to the scenario 1, after redirection of the UEs attached to the under utilized RRHs towards their secondary choice, the total consumed power using the proposed E-RRH assignment scheme is lower. This is explained by the fact that the secondary RRHs of the UEs are closer to the UEs, contrary to the scenario 1. So the secondary choices of the UEs transmit less power as compared to the scenario1.

From this study, it can be deduced that when the UEs are concentrated in one hotspot, the total consumed power using the proposed E-RRH assignment scheme is considerably lower than the power consumed when the conventional C-RRH assignment scheme is applied. Consequently, the proposed E-RRH assignment scheme helps better coordinate the energy consumption in the network and takes better advantage of the system architecture of the H-CRAN.

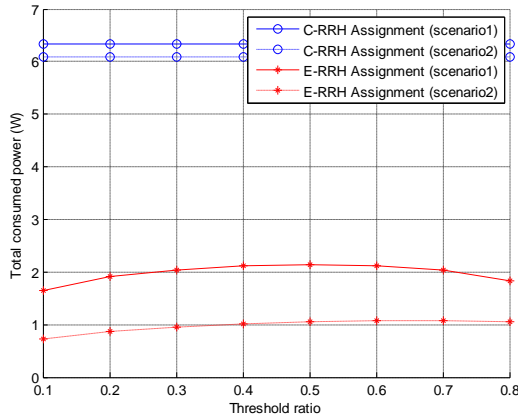


Fig. 9: Total consumed power in the system vs. the number of users for $K=150$ and $M=50$.

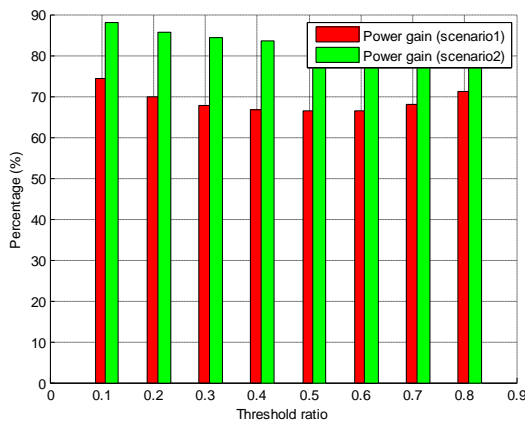


Fig. 10: Percentage of the power gain for the proposed E-RRH Assignment scheme vs. the threshold ratio ($K=150$ and $M=50$).

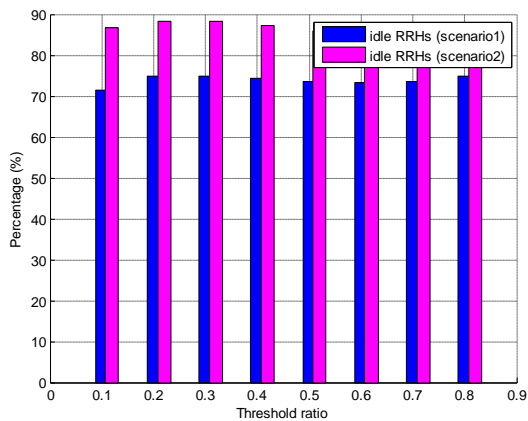


Fig. 11: Percentage of the idle RRHs for the proposed E-RRH Assignment scheme vs. the threshold ratio ($K=150$ and $M=50$).

5. CONCLUSION

The paper aimed at designing a new Energy-based RRH assignment scheme to reduce the total power consumption in a 5G H-CRAN network.

An algorithm which switches to an idle mode all RRHs whose transmit power is below a certain power threshold is defined. Then the UEs are assigned to other RRHs in the network

without exceeding the total transmit power in the system and while meeting their required throughput. In this paper, the evolution of the total consumed power with a uniform distribution of UEs and distribution of the UEs in a hotspot and according to three parameters: the number of UEs in the network, the number of RRHs in the macrocell and the power threshold is analyzed.

It is shown that the proposed Energy-based RRH assignment scheme reduces the total consumed power by more than 60% when the UEs are uniformly distributed in the network and by more than 80% when the UEs are concentrated in one area of the macrocell. This power gain can increase with the increase of the cell load and the number of RRHs in the network especially when the threshold ratio is properly chosen.

Future research will look at the impact of the proposed Energy-based RRH assignment scheme on the activation of some BBUs inside the BBU pool of the H-CRAN in order to further improve the Energy Efficiency of the system.

6. REFERENCES

- [1] PENG, Mugen, YU, Yuling, XIANG, Hongyu. Energy-efficient resource allocation optimization for multimedia heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE transactions on Multimedia*, 2016, vol. 18, no 5, p. 879-892.
- [2] PENG, Mugen, LI, Yuan, JIANG, Jiamo. Heterogeneous cloud radio access networks: A new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies. *IEEE Wireless Communications*, 2014, vol. 21, no 6, p. 126-135.
- [3] PENG, Mugen, LI, Yong, ZHAO, Zhongyuan. System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE network*, 2015, vol. 29, no 2, p. 6-14.
- [4] KULLIN, C, RAN, D. C-ran the road towards green ran. China Mobile Research Institute, White Paper, 2011
- [5] NAMBA, Shinobu, WARABINO, Takayuki, KANEKO, Shoji. BBU-RRH switching schemes for centralized RAN. In : *Communications and Networking in China (CHINACOM)*, 2012 7th International ICST Conference on. IEEE, 2012. p. 762-766.
- [6] BOULOS, Karen, EL HELOU, Melhem, LAHOUD, Samer. RRH clustering in cloud radio access networks. In: *Applied Research in Computer Science and Engineering (ICAR)*, 2015 International Conference on. IEEE, 2015. p. 1-6.
- [7] XU, S., WANG, S. (2016, May). Efficient Algorithm for Baseband Unit Pool Planning in Cloud Radio Access Networks. In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2016 IEEE 83rd (pp. 1-5). IEEE.
- [8] LEE, Ying Loong, WANG, Li-Chun, CHUAH, Teong Chee. Joint Resource Allocation and User Association for Heterogeneous Cloud Radio Access Networks. In : *Teletraffic Congress (ITC 28)*, 2016 28th International. IEEE, 2016. p. 87-93.
- [9] DOLFI, Marco, MOROSI, Simone, CAVDAR, Cicek. Energy efficient optimization of a sleep mode strategy in heterogeneous cellular networks. In : *Networks and Communications (EuCNC)*, 2017 European Conference on. IEEE, 2017. p. 1-6.

- [10] ZUO, Jun, ZHANG, Jun, YUEN, Chau. Energy efficient user association for cloud radio access networks. *IEEE Access*, 2016, vol. 4, p. 2429-2438.
- [11] DAI, Yongyu, JIN, Shi, PAN, Leyuan. Interference control based on beamforming coordination for heterogeneous network with RRH deployment. *IEEE Systems Journal*, 2015, vol. 9, no 1, p. 58-64.
- [12] KHAN, M., ALHUMAIMA, RAAD S., AL-RAWESHIDY, HAMED S. Reducing energy consumption by dynamic resource allocation in C-RAN. In: *Networks and Communications (EuCNC), 2015 European Conference on. IEEE*, 2015. p. 169-174.