UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Optimisation de la consommation d’énergie avec OLSR dans des réseaux de capteurs sans fil

Ntakarutimana, Innocent

2022-01
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/524

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

République du Burundi
Ministère de l'Education Nationale
et de la Recherche Scientifique

Université du Burundi
Faculté des Sciences de l'Ingénieur



Master en Génie Informatique

Année Académique :
2021-2022

OPTIMISATION DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE AVEC OLSR DANS DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL.

MEMOIRE

Présenté Par

NTAKARUTIMANA Innocent

à la

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR (FSI)

En vue de l'obtention du grade de

MASTER

en

Génie Informatique

Soutenu le 02 /03 /2023, devant le jury composé de :

Pr.	BANGURAMBONA Bonaventure	: Président
Dr.	MUKESHIMANA Michelle	: Vice-président
Dr.	NIBITANGA Roméo	: Secrétaire
Pr.	MANIRABONA Audace	: Directeur
Pr.	NDIKUMAGENGE Jérémie	: Membre

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY

Pr. MANIRABONA Audace : Directeur de Thèse

Pr. BANGURAMBONA Bonaventure : Président du Jury

Dr. MUKESHIMANA Michelle : Vice-Président du Jury

Dr. NIBITANGA Roméo : Secrétaire du Jury

Pr. NDIKUMAGENGE Jérémie : Membre du Jury

DEDICACES

A Dieu Tout Puissant,

A Chers parents,

A ma famille,

A mes amis et connaissances,

A mes compagnons de classe.

REMERCIEMENTS

Ma reconnaissance la plus profonde et ma gratitude la plus sincère à mon DIEU, Eternel Tout Puissant pour sa gloire.

Je reviens à présenter mes plus sincères remerciements à mon directeur de mémoire Pr Audace MANIRABONA, recteur de notre université, tout enseignant à l'université du Burundi en particulier ceux du département des Tics de la Faculté des Sciences de l'Ingénieur pour m'avoir suivi tout au long de mon cursus académique et m'encadrer le long de la réalisation de ce mémoire.

Leurs directives, leurs recommandations et leurs conseils m'ont transformé en homme de science et de conscience. Mes remerciements les plus vifs s'adressent aussi à ceux qui m'ont fait l'honneur de faire partie du jury de mon mémoire. Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

J'adresse ma gratitude aux enseignants qui ont contribué à ma formation depuis la première année et à mes collaborateurs de classe.

RESUME

Dans ce mémoire, on a implémenté un mécanisme d'optimisation de l'énergie dans un réseau de capteurs sans fils et mobile WSN/MANET à l'aide du protocole OLSR. Pour parvenir à tel résultat, on a passé de l'analyse de l'existant en étudiant comment la consommation d'énergie se déroule et constitue un handicap majeur dans les réseaux MANET/WSN.

Par après, on s'est focalisé à l'étude du protocole OLSR standard et presque toutes les solutions relatives à l'optimisation de l'économie énergétique à l'aide d'OLSR en attirant attention sur les principaux paramètres mis en œuvre. Ce sont les concepts du choix des nœuds responsables MPR en se basant sur certaines métriques d'optimisation énergétique, qui ont été servis. Ces derniers permettent d'optimiser sous différents niveaux la globalité des cas étudiés.

En fin, on s'est lancé à l'étude et l'analyse du comportement de la topologie du réseau et le protocole OLSR suivant les paramètres envisagés pour optimiser l'économie énergétique en comparant le rythme de la consommation énergétique ainsi que d'autres résultats selon la taille et la mobilité du réseau. L'étude comparative de toutes ces solutions proposées nous a permis d'implémenter et simuler un mécanisme à l'aide d'un logiciel de modélisation mathématique MATLAB.

Mots clés : OLSR, WSN, MANET, MPR, optimisation, MATLAB.

ABSTRACT

In this dissertation, we implemented an OLSR mechanism for energy efficiency optimization in wireless and mobile sensor networks (MANET/WSN). To achieve such a result, we started from the analysis of the situation by reviewing how energy consumption is a major issue/handicap in MANET/WSN.

Then after, we focused on the study of the standard OLSR protocol and almost all solutions related to the OLSR optimization for energy efficiency by drawing attention to the main settings implemented. These are the concepts of choosing the responsible MPR nodes based on certain energy optimization metrics, which have been served. These allow to optimize under different levels the globality of the studied cases.

Finally, we started to study and analyze the behavior of the network topology and OLSR protocol according to the settings considered to optimize the energy efficiency by comparing the rate of energy consumption as well as other results depending on the network size and mobility. The comparative study of all these proposed solutions allowed us to implement and simulate our mechanism using MATLAB which is a mathematical modeling software.

***Keywords**: OLSR, WSN, MANET, MPR, optimization, MATLAB.*

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY i

DEDICACES ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

ABSTRACT v

TABLE DES MATIERES vi

LISTE DES FIGURES x

LISTE DES TABLEAUX xi

LISTE DES SIGLES ET ABBREVIATIONS xii

AVANT-PROPOS xvi

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAP I. GENERALITE ET CADRE DU PROJET 3

I.1. Justification du contexte : Généralité 3

I.2. Objectifs du Projet 4

I.2.1. Objectif global 4

I.2.2. Objectifs spécifiques 4

I.3. Problématiques 4

I.4. Solutions proposées 5

I.5. Résultats attendus 5

I.6. Apports scientifiques et technologiques 5

I.7. Domaines d'applications 6

I.8. Méthodologie utilisée 6

I.9. Outils mathématiques utilisés 6

I.10. Outil de simulation 6

CHAP II. INTRODUCTION AUX RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL 7

II.1. Généralités 7

II.2. Capteurs sans fil.....7

II.3. Types de réseaux de capteurs sans fil et mobile 8

II.3.1. Réseau de capteurs sans fil 9

II.3.2. Réseaux ad hoc sans fil 10

II.3.3. Réseaux mobiles ad hoc MANET.....11

II.3.4. Réseaux maillés sans fil 13

II.4. Protocoles de routages dans des réseaux mobiles ad hoc sans fil MANET 15

II.4.1. Introduction.....15

II.4.2. Classification des protocoles de routage dans les réseaux MANET.....16

II.4.3. Protocole de routage proactif OLSR.....17

CHAP III. PROBLEME D'ENERGIES DANS LES RESAUX MANET 24

III.1. Introduction 24

III.2. Energies consommées pendant la détection ou la capture 24

III.3. Energies consommées pendant le traitement des données 25

III.4. Energies consommées pendant la communication.....26

III.4.1. Consommation d'énergies au démarrage 26

III.4.2. Consommation d'énergie pendant la commutation 27

III.5. Modèle énergétique simplifié.....29

CHAP IV. OPTIMISATION D'ENERGIES DANS UN RESEAU MANET OU WSN.....31

IV.1. Modèle de la batterie.....31

IV.2. Durée de vie d'un réseau.....32

IV.3. Mobilité d'un nœud capteur.....33

IV.4. Métriques de rangs multicritères d'un nœud MCNR.....34

IV.4.1. Rang d'un nœud basé sur la batterie résiduelle.....34

IV.4.2. Rang d'un nœud basé sur la durée d'inactivité 34
IV.4.3. Rang d'un nœud basé sur la longueur de la file d'attente 35
IV.4.4. Rang de nœud basé sur la mobilité 35
IV.5. Calcul du coût des liens basés sur la métrique MCNR 36
IV.6. Exemple d'optimisation d'énergies : Le balancement de charges 37
IV.6.1. Algorithme de 1-ILBH et N-ILBH 37
IV.6.2. Algorithme de N-ILBH 39
CHAP V. REVUE DE SOLUTIONS D'OPTIMISATION D'ENERGIES DANS UN RESEAU MANET ET WSN AVEC OLSR 43
V.0. Introduction 43
V.1. Solutions avec les mécanismes à chemin unique 43
V.1.1. Solution ou mécanisme avec la méthode M-OLSR 44
V.1.2. Solution ou mécanisme avec la méthode EI-OLSR 44
V.1.3. Solution ou mécanisme avec la méthode EEPR-OLSR 44
V.1.4. Solution ou mécanisme avec la méthode OPE-OLSR 45
V.1.5. Solution ou mécanisme avec la méthode EOLSR 46
V.1.6. Solution ou mécanisme avec la méthode EEM-OLSR 47
V.1.7. Solution ou mécanisme avec la méthode EE-OLSR 48
V.1.8. Solution ou mécanisme avec la méthode EM-OLSR 50
V.2. Solutions avec mécanismes de choix des MPR sécurisés 51
V.2.1. Solution avec la méthode ES-OLSR 51
V.2.2. Solution ou mécanisme avec la méthode EIMO-ESOLSR 53
V.3. Solutions avec les mécanismes à chemins multiples 56
V.3.1. Solution ou mécanisme avec la méthode MBA-OLSR 56
V.3.2. Solution ou mécanisme avec la méthode MBQA-OLSR 57
V.3.3. Solution ou mécanisme avec la méthode MBMA-OLSR 61

V.3.4. Solution ou mécanisme avec la méthode MEQSA-OLSRv2 62

CHAP VI. ETUDE COMPARATIVE DES SOLUTIONS D'OPTIMISATION D'ENERGIES DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS MOBILES SANS FIL 65

VI.1. Introduction 65

VI.2. Comparaison entre (EIMO)ESOLSR et d'autres méthodes à chemins uniques 65

VI.3. Comparaison entre les méthodes à chemins multiples 66

VI.3.1. Comparaison entre les méthodes MBMA-OLSR et MBQA-OLSR 67

VI.3.2. Comparaison de mécanismes MEQSA-OLSRv2, MBMA-OLSR et MBQA-OLSR ..68

VI.3.3. Comparaison sur la structure et modèle de traitement de données 69

Conclusion sur ce chapitre 79

CHAP VII. APPORTS SCIENTIFIQUES ET PERSPECTIVES.....80

VII.1. Modèles de la mobilité des nœuds dans les réseaux MANET.....81

VII.2. Choix des MPR basé sur leurs énergies et leurs comportements 82

VII.3. Agrégation de données au niveau des nœuds MPR.....86

VII.4. Comparaison des réseaux MANET/WSN avec et sans agrégation de données 87

VII.5. Résultats de la simulation 88

VII.5.1. Sélection des nœuds responsables MPR 89

VII.5.2. Durée de vie d'un réseau.....90

VII.5.3. Energie consommée 91

Conclusion sur ce chapitre 93

CONCLUSION GENERALE 94

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....95

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Architecture d'un nœud capteur ---------- 8
Figure 2. Architecture d'un WSN---------- 10
Figure 3. Architecture d'un réseau Ad hoc ---------- 11
Figure 4. Architecture d'un MANET---------- 12
Figure 5. Protocoles de routage dans un réseau MANET---------- 16
Figure 6. Format du message HELLO et TC du protocole OLSR---------- 18
Figure 7. Exemple de la sélection des MPR ---------- 22
Figure 8. La répartition de la consommation énergétique d'un nœud MicaZ ---------- 25
Figure 9. Modèle énergétique simplifié ---------- 29
Figure 10. Bloc de niveau d'un système de batteries intelligentes---------- 32
Figure 11. Architecture du modèle EIMO-ESOLSR dans MANET ---------- 54
Figure 12. Structure MBQA-OLSR et son modèle de traitement de données ---------- 70
Figure 13. Structure MBMA-OLSR et son modèle de traitement de données---------- 71
Figure 14. Structure, fonctionnalités de MEQSA-OLSRv2 et modèle de traitement de données-- 72
Figure 15. Modèles de la mobilité aléatoire des nœuds RWP---------- 82
Figure 16. Architecture de modèle proposé pour le choix des MPR ---------- 86
Figure 17. Diagramme des processus d'agrégation de données ---------- 87
Figure 18. Topologie d'un réseau MANET avec les MPR---------- 90
Figure 19. Durée de vie d'un réseau MANET/WSN ---------- 91
Figure 20. Energie consommée et restante---------- 92

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. La différence entre un réseau ad hoc sans fil et un réseau de capteurs sans fil 14
Tableau 2. Sélection de la volonté basée sur l'énergie.....49
Tableau 3. Comparaison entre ESOLSR et autres solutions à chemins uniques.....65
Tableau 4. Comparaison entre MBMA-OLSR et MBQA-OLSR.....67
Tableau 5. Délai de bout en bout en sec pour temps de pause variable.....67
Tableau 6. Nombre de Paquets libérés dans la file d'attente FIFO selon un temps de pause 68
Tableau 7. Nœuds Morts Vs Temps De Pause 68
Tableau 8. Fonctionnalités des mécanismes d'optimisation d'énergies avec OLSR.....73
Tableau 9. Comparaison des solutions proposées pour optimiser l'énergie dans MANET 78
Tableau 10. Comparaison entre les réseaux MANET/WSN avec et sans agrégation de données...88
Tableau 11. Paramètres de Simulation avec MATLAB 89

LISTE DES SIGLES ET ABBREVIATIONS

AB : Available Bandwidth

ABR : Associativity Based Routing

ADC : Analogic to Digital Converter

AODV : Ad hoc On-demand Distance Vector

ASYM : Asymmetric

BS : Base Station

CBRP : Cluster Based Routing Protocol

CEI : Composite Eligibility Index

CMMBCR : Conditional Min-Max Battery Cost Routing

DAE : Data Aggregation Energy

DC-DC : Decoupled Control to Digital Converter

DR : Drain Rate

DSDV : Destination-Sequenced Distance-Vector

DSR : Dynamic Source Routing

EA-MPR : Energy Aware for Multi Point Relay

EEM-OLSR : Energy Efficient Mechanism Optimized Link State Routing

EE-OLSR : Energy Efficient Optimized Link State Routing

EEPR-OLSR : Energy Efficient and Path Reliability Optimized Link State Routing

EIMO-ESOLSR : Enhanced Intellects-Masses Optimizer ESOLSR

EI-OLSR : Energy efficient by Improving Optimized Link State Routing

EMA-MPR : Energy and Mobility-Aware MultiPoint Relay

EM-OLSR : Energy efficient and Mobility Optimized Link State Routing

EOLSR : Optimized Link State Routing for Energy consumption

EOLSR-EC : EOLSR Energy Consumption

EOLSR-RE : EOLSR Residual Energy

EQSA-MPR : Energy and Quality of Services Aware Multi Point Relay

ES-OLSR : Energy efficient and Secure Optimized Link State Routing

FB : Forward Behavior

FTP : File Transport Protocol

HNA : Host and Network Association

ICMP : Internet Control Management Protocol

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineering

IET : Institute of Engineering and Technology

IETF : Internet Engineering Task Force

IoT : Internet of Thing

LT : Life Time

MAC : Medium Access Control

MANET : Mobile Ad hoc Network

MAWN : Multipath Ad hoc Wireless Network

MBA-OLSR : Multipath Battery Aware Optimized Link State Routing

MBCR : Minimum Battery Cost Routing

MBMA-OLSR : Multipath Battery and Mobility Aware Optimized Link State Routing

MBMA-OLSRv2 : Multipath Battery and Mobility Aware Optimized Link State Routing version 2

MBQA-OLSR : Multipath Battery and Queue Aware Optimized Link State Routing

MCNR : Multi-Criteria Node Rank

MCU : Micro Controller Unit

MDR : Minimum Drain Rate

MEQSA-OLSRv2 : Multipath Energy and Quality of Service Aware OLSR version 2

MID : Multiple Interface Declaration

M-OLSR : Modified Optimized Link State Routing

MP : Misbehavior Probability

MP2P : Multipath Peer to Peer

MP-OLSR : Multiple Path Optimized Link State Routing

MPQ-OLSR : Multiple Path QoS Optimized Link State Routing

MPR : Multipoint Relay

MTPR : Minimum Total Transmission Power Routing

MWSN : Mobile Wireless Sensor Networks

N –ILBH : N Interval based Load Balancing Heuristic

OLSR : Optimized Link State Routing

OPE-OLSR : Optimizing Performance and Energy OLSR

P2P : Peer to Peer

PC : Protocol Clustering

PDR : Packet Delivered Ratio

PF : Power Factory

QO : Queuing Occupancy

QoS : Quality of Services

RB : Residual Battery

RBE : Remaining Battery Energy

RD : Random Direction Model

RF : Radio Frequency

RFC : Request For Comment

RW **:** Random Walker model

RWP : Random WayPoint model

SYM : Symmetric

TBRP : Novel Tree Based Routing Protocol

TC : Topology Control

TLV : Type-Length-Value

TORA : Temporally Ordered Routing Algorithm

VANET : Vehicular Ad hoc Network

WBAN : Wireless Body Area Network

WILL : Willingness

WMN : Wireless Mesh Network

WSN : Wireless Sensor Network

ZRP : Zone Routing Protocol

AVANT-PROPOS

Comme stipule le sujet de ce travail de recherche « Optimisation de la consommation d'énergie avec OLSR dans des réseaux de capteurs sans fil et mobile WSN/MANET ». Ce travail a été effectué en se référant au rythme de la consommation d'énergie dans des réseaux de capteurs sans fil et mobiles. On a alors organisé ce travail en six chapitres.

Au chapitre premier, on a essayé d'analyser un peu le degré d'utilisation des réseaux de capteurs sans fil et mobiles WSN/MANET dans diverses domaines d'applications modernes et présenter les grandes lignes de ce projet de mémoire.

Dans le second chapitre, on a fait une brève introduction aux réseaux de capteurs sans fil et mobiles dans le but d'analyser leur principe de fonctionnement ainsi que leurs types et leurs domaines d'applications.

Le troisième chapitre présente les différentes phases de consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil et mobiles ainsi que le rythme de la consommation d'énergie par un nœud capteur selon sa position, son comportement et son état.

Le quatrième chapitre consiste à étudier les paramètres fondamentales d'optimisation d'énergie dans des réseaux de capteurs sans fils et mobiles. Dans ce chapitre, on va montrer l'intérêt de chaque paramètre lors de sa prise en considération et sur quoi, il optimise l'énergie d'un nœud capteur.

Le cinquième chapitre nous aide à faire une analyse approfondie d'une revue scientifique de toutes les solutions d'optimisation d'énergies à l'aide du protocole OLSR proposées par des chercheurs scientifiques. Dans ce chapitre, on a pu étudier et analyser les variantes d'OLSR pour optimiser l'énergie et leurs paramètres prises en considération, ainsi que leur niveau de succès et de défaillance pendant le processus d'optimisation d'énergie en fonction du type et de la taille du réseau.

Le sixième chapitre consiste à faire une analyse comparative des solutions d'optimisation d'énergie dans des réseaux de capteurs sans fil et mobile à l'aide du protocole OLSR. C'est à partir de cette analyse qu'on a pu cadré et délimité ce travail en ajoutant d'autres paramètres à envisager pour augmenter considérablement la durée de vie du réseau et une bonne qualité de services.

Le septième chapitre qui est aussi le dernier chapitre relate d'un apport scientifique et perspectives, c'est-à-dire une contribution visant à améliorer les solutions d'optimisation d'énergie avec OLSR

déjà proposées dans le but d'augmenter la durée de vie du réseau ainsi qu'une amélioration de la qualité de services réseau.

En fin, une conclusion générale récapitulera les principaux résultats obtenus après simulations et présentera aussi les perspectives d'avenir pour ce projet d'étude.

Le choix de ce sujet a été motivé/soutenu par le fait que dans la plupart des réseaux de capteurs sans fils et mobiles, le problème de la consommation d'énergie constitue un problème majeur car l'épuisement de la batterie d'un nœud capteur cause la destruction du réseau en diminuant sa durée de vie et engendre une mauvaise qualité de services réseaux.

INTRODUCTION GENERALE

La manière dont l'informatique a révolutionné l'activité intellectuelle et économique n'a pas d'équivalent dans d'autres domaines. Sans être explicite, les spécialistes de la civilisation estiment sans détour que l'humanité est en train de vivre sa quatrième révolution industrielle qu'est l'ère numérique.

Le traitement et la communication d'informations sont l'une des richesses les plus fondamentales de toute société organisée. Déjà l'invention d'ordinateurs et d'autres dispositifs intelligents, a été une avancée révolutionnaire pour l'homme qui avait dorénavant trouvé un moyen pour traiter les données et les communiquer en temps réel avec des points de l'espace de plus en plus lointains, débarrassé de la contrainte d'une présence physique au côté de son interlocuteur.

L'essor des technologies des réseaux filaires, sans fil et mobiles offre aujourd'hui de nouvelles perspectives dans le domaine d'informatiques et des télécommunications. L'évolution récente des moyens de communication (filaire, sans fil et mobile), a permis la collecte et la manipulation d'information à travers des unités de calculs dynamiques qui ont des caractéristiques particulières (une faible capacité de stockage, une source d'énergie autonome…) et accèdent au réseau à travers une interface de communication sans fil. D'où la naissance d'un environnement nouveau de communication appelé environnement mobile sans fil.

Les progrès actuels des dispositifs ou appareils intelligents dotés de technologies sans fil ont ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine des réseaux sans fil et ont permis aux utilisateurs de communiquer point à point (D2D) ou à multipoints indépendamment du lieu, du temps et de l'endroit. Un ensemble de dispositifs autonomes mobiles et/ou stationnaires dotés d'une technologie sans fil peut être interconnecté par des liaisons sans fil pour former un réseau sans fil multi-sauts dynamiquement temporaire MANET. Ces réseaux sans fil ad hoc multi-sauts MAWN par exemple MANET, WSN, VANET et WMN, sont considérés comme des technologies clés pour fournir une grande variété d'applications et de services d'Internet d'objets (IoT) afin d'améliorer la qualité de vie humaine.

Ils consistent de recueillir les informations surveillées par un grand nombre de capteurs qui collaborent et les communiquer en temps réel au centre de traitement, contrairement aux scénarios habituels, les données peuvent être transmises du capteur de terrain au serveur via des nœuds WSN et/ou MANET intermédiaires.

Dans le cas de données urgentes (par exemple, gestion des catastrophes et des secours, surveillance des villes, sécurité des habitations et secteurs militaires) pour lesquelles une collecte efficace des données est essentielle, les données seront acheminées via des nœuds MANET en raison de leur supériorité en termes d'énergie et de capacités de traitement par rapport aux capteurs habituels. Ainsi, des chemins plus efficaces seront sélectionnés pour l'acheminement des données afin d'assurer la réussite de la transmission des données au serveur et de surmonter les problèmes techniques liés aux limites des WSN/MANET typiques (énergie limitée, retard, faible débit de données, etc.).

Une grande variété de protocoles de routage éco énergétiques ont été proposés dans la littérature, en fonction des paramètres liés à l'énergie. Cependant, la plupart des études se sont concentrées sur un seul chemin et non sur des protocoles de routage à trajets multiples. L'épuisement rapide de la batterie des nœuds dans le chemin sélectionné fait partie des restrictions de ces schémas à chemin unique. Cela est dû au fait que les nœuds faisant partie des chemins sélectionnés sont très encombrés et participent à la transmission de la plupart des données, tandis que les autres sont surtout occupés par des activités de recherche et participent à la transmission de la plupart des données, bien que d'autres sont le plus souvent inactifs.

Dans ce travail de recherche, on verra l'intérêt du protocole de routage OLSR ainsi que ses variantes lors de l'optimisation de la consommation d'énergie dans des réseaux de capteurs sans fil et ou mobiles pour augmenter la durée de vie d'un nœud capteur ainsi que l'amélioration de la qualité de services réseau. On définira les paramètres à envisager ainsi que les algorithmes cadençant les nœuds capteurs pour éviter l'épuisement rapide de leurs batteries dans le but d'augmenter la dure de vie du réseau ainsi que l'amélioration de la qualité de services réseaux.

CHAP I. GENERALITE ET CADRE DU PROJET

I.1. Justification du contexte : Généralité

Les progrès actuels des dispositifs intelligents dotés de technologies sans fil ont ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine des réseaux sans fil et ont permis aux utilisateurs d'assurer une communication point à point ou à multipoints, indépendamment du temps et de l'endroit. Un ensemble de dispositifs autonomes mobiles et/ou stationnaires dotés d'une technologie sans fils peut être interconnecté via des liaisons sans fil pour former un réseau dynamiquement temporaire avec ou sans l'aide d'une administration centralisée ou d'un support fixe [1]. Ces réseaux sans fil sont soit des réseaux de capteurs sans fil à simple chemin ou à chemins multiples (MAWN, MANET, WSN, VANET, WBAN et WMN) et sont considérés comme des technologies clés pour fournir une grande variété d'applications et de services d'Internet des objets (IoT) afin d'améliorer la qualité de vie humaine [2] et [3].

Certains de ces réseaux sont composés d'un grand nombre de capteurs à faible coût déployés librement et dynamiquement pour former un réseau sans fil et sans infrastructure fixe dans le but de capter, recevoir et transmettre des informations relatives aux données d'une zone restreinte. C'est la raison pour laquelle ces réseaux enregistrent des avantages non négligeables spécialement sa capacité à étendre la connectivité de manière à permettre deux ou plusieurs nœuds sans connexion directe de communiquer en utilisant un protocole de routage bien défini via des nœuds intermédiaires.

La plupart des nœuds dans les scénarios WSN sont des nœuds fixes avec de faibles ressources énergétiques et de faibles débits de données. Ces nœuds détectent les données du milieu environnant et les envoient via de multiples fiabilités au nœud récepteur (racine), qui à son tour met à jour les données collectées sur le serveur. En revanche, la plupart des nœuds dans les scénarios MANET sont mobiles et disposent de capacités de traitement et de réserves d'énergies supérieures. Mais tous ces réseaux fonctionnent sous contraintes d'énergie par cause que ses batteries sont minimes et parfois non remplaçable et non rechargeable, alors qu'ils traitent des informations importantes.

Pour pallier à ces problèmes de la consommation d'énergie, qui s'observent dans la plupart des réseaux de capteurs sans fil et mobiles MANET, divers protocoles de routage ont été proposés par l'IETF, tels que le protocole OLSR, AODV et DSR [4] - [7]. Parmi ces protocoles proposés, OLSR est le plus envisagé pour optimiser l'économie d'énergies dans les réseaux MANET selon son processus des nœuds MPR car ce paramètre crucial énergétique doit être pris en compte pendant le

mécanisme de sélection des nœuds MPR en raison de deux facteurs principaux : premièrement, la consommation d'énergie des nœuds MPR est plus élevée que celle des nœuds non-MPR car ils doivent relayer le trafic de données/contrôle au nom des nœuds (sélecteur MPR) qui les ont sélectionnés comme MPR. Deuxièmement, les nœuds alimentés par des batteries dans les réseaux MANET disposent d'une ressource énergétique limitée. En outre, suite au manque d'énergies et d'une consommation énergétique élevée, ces nœuds MPR ont tendance à mal se comporter afin de conserver leur énergie en abandonnant les paquets d'un nœud émetteur sous prétexte de les transmettre. Il en résulte une perte d'énergies au niveau d'un nœud émetteur.

Les problèmes mentionnés ci-haut sont liés à l'optimisation d'énergies dans les réseaux de capteurs sans fils et mobiles WSN/MANET.

I.2. Objectifs du Projet

I.2.1. Objectif global

L'objectif global est d'optimiser l'utilisation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil et mobile à l'aide du protocole OLSR tout en assurant le choix dynamique des nœuds responsables MPR basé sur le niveau d'énergie résiduelle de leurs batteries, de leur mobilité, de leur probabilité d'un mauvais comportement et le processus d'agrégation de données dans le but d'augmenter la durée de vie du réseau et une bonne qualité de services réseau.

I.2.2. Objectifs spécifiques

Les principaux objectifs spécifiques sont :

1) Etudier les principes de fonctionnement du protocole OLSR
2) Analyser des solutions d'optimisation d'énergies proposées avec le protocole OLSR
3) Comparer ces solutions proposées
4) Proposer une solution efficace en combinant les métriques d'économie énergétique multicritères et la probabilité d'un mauvais comportement avec intégration d'un mécanisme d'agrégation de données au sein des nœuds MPR.
5) Comparer les résultats après la simulation avec ceux proposés par d'autres chercheurs

I.3. Problématiques

Etant donné que la consommation d'énergie dans des réseaux de capteurs sans fil et mobiles constitue un problème majeur sur le fait que les batteries de ces derniers sont de petites tailles, ne sont ni rechargeable voir même ni remplaçable selon l'endroit où le capteur est déployé. Ce qui

provoque une très courte durée de vie du réseau ainsi qu'une dégradation énorme de la qualité de services réseau.

Selon l'importance des réseaux de capteurs sans fil dans le monde actuel et dans la plupart des secteurs de développement, on se demande si l'optimisation d'énergies à l'aide du protocole de routage OLSR serait-il un moyen pour déraciner ces problèmes ?

I.4. Solutions proposées

Suite aux problèmes de la taille des batteries des nœuds capteurs qui est minime et dont leur remplacement et leur rechargeabilité sont presque impossible. On admet que les solutions proposées ci-après seront à la problématique : choix des nœuds responsables MPR en se basant sur les métriques d'optimisation d'énergies comme le niveau d'énergies résiduelles de sa batterie, sa vitesse de la mobilité, sa durée de vie, sa durée de temps d'inactivité, son occupation de la file d'attente, ..., ainsi que sur la probabilité de son mauvais comportement. Définition d'un mécanisme d'agrégation de données aux nœuds responsable MPR pour optimiser l'énergie consommée durant la transmission ou le transfert de données c'est-à-dire durant l'émission, la réception et l'accusé de réception d'une façon régulière.

I.5. Résultats attendus

Ce projet de recherche mettra en place un mécanisme permettra d'assurer :

1. Choix des MPR ayant une volonté très élevée et un paramètre de sélection supérieur ou égale à 14 ;
2. Envois de données agrégées, filtrées et sans doublons ;
3. Augmentation de la durée de vie du réseau ainsi que l'amélioration de la qualité de service.

I.6. Apports scientifiques et technologiques

Avec ce nouveau mécanisme proposé, on est capable de résoudre le problème de la consommation d'énergie dans des réseaux de capteurs sans fil et mobiles en envisageant :

1. Le choix de nœuds responsables MPR prenant en compte la combinaison de toutes les métriques énergétiques d'optimisation d'énergie ainsi que l'indice d'éligibilité composite dans des réseaux denses et de mobilité moyenne ;
2. Intégration d'un mécanisme d'agrégation de données au sein de nœuds responsables MPR pour supprimer les données redondantes et envisager une transmission-réception règlementaire.

I.7. Domaines d'applications

Ces solutions seront appliquées dans les réseaux de capteurs sans fils mobiles MANET denses et de moyenne mobilité, qui sont utiles plus particulières dans les villes intelligentes, dans la surveillance de la circulation routière : réseau VANET, dans la surveillance des catastrophes naturelles, dans la surveillance de l'environnement, dans l'agriculture intelligente, dans le domaine militaire sur les champs de batail, dans les secteurs industriels et commerciaux, en datamining, etc.

I.8. Méthodologie utilisée

Pour mener à bien ce travail de recherche, on a fait recours aux nombreux algorithmes proposés par des chercheurs pour assurer le choix optimisé en consommation énergétique des nœuds responsables MPR et à la qualité de services réseaux.

I.9. Outils mathématiques utilisés

L'étude et la proposition d'un mécanisme permettant d'optimiser la consommation d'énergie dans des réseaux de capteurs sans fil et mobile avec OLSR consiste à utiliser des outils ou modèles mathématiques d'optimisation comme :

1. Modèle linéaire de batteries
2. Modèle RWP
3. Modèle de DIJIKSTRA

Avec ces outils, on a pu optimiser la consommation d'énergie dans des réseaux de capteurs sans fil et mobile en optimisant la durée de vie des batteries, la mobilité des nœuds capteurs ainsi que le choix d'une route la plus courte et optimale en énergie.

I.10. Outil de simulation

Dans ce projet, on a utilisé l'outil de simulation MATLAB.

CHAP II. INTRODUCTION AUX RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

II.1. Généralités

Contrairement à son prédécesseur, le réseau de capteurs sans fil statiques WSN, les réseaux de capteurs sans fil mobiles (MWSN), également appelés réseaux Ad hoc mobiles sans fil, constituent une petite industrie émergente dans le monde de la recherche. Dans ce cas, les capteurs sont rassemblés pour enregistrer un phénomène physique se produisant naturellement (comme la température, l'humidité, la pression, etc.) dans une zone spécifique. Il nécessite l'installation initiale d'une infrastructure de communication afin d'établir un chemin entre la station de base et les nœuds de capteurs pour assurer la mise à jours des données sur le serveur.

D'autre part, un réseau de nœuds capteurs sans fil avec mobilité (MWSN) peut être défini comme un réseau de capteurs sans fil (WSN) avec des nœuds de capteurs mobiles ou réseau MANET. Selon l'usage auquel ils sont destinés, les nœuds peuvent être mobiles en étant attachés à des objets mobiles comme un robot, un humain, un animal, un véhicule, ..., ou en faisant librement eux même un déplacement. Par exemple, dans les applications militaires, les nœuds peuvent être attachés à des soldats ou à des camions, tandis que dans d'autres cas, dans les applications de surveillance des habitats écologiques, ils peuvent être attachés à des animaux pour suivre leurs mouvements. Pour obtenir plus de données possibles sur l'environnement, ils peuvent utiliser la mobilité des nœuds libres. En outre, les nœuds mobiles se déplacent dynamiquement tout en s'adaptant aux changements de l'environnement ou d'autres domaines d'application.

II.2. Capteurs sans fil

Les capteurs sans-fil considérés ici sont conçus comme de véritables systèmes embarqués, dotés de moyens de traitement et de communication de l'information, en plus de leur fonction initiale de relever des mesures. Ils représentent une révolution technologique des instruments de mesure, issue de la convergence des systèmes électroniques miniaturisés et des systèmes de communication sans-fil. L'architecture d'un nœud capteur est complètement dépendante de l'objectif de son déploiement. Néanmoins, quatre unités de base sont présentées dans chaque capteur sans fil à savoir [8] :

1. **L'unité de captage :** transforme les signaux analogiques fournis par le capteur en signaux numériques compréhensibles par l'unité de traitement ;
2. **L'unité de traitement :** gère les procédures permettant aux nœuds de collaborer avec le reste du réseau et peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche au collecteur;

3. **L'unité de transmission :** effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un medium sans-fil. Elle peut être de type radiofréquence (RF) ou de type optique ;
4. **L'unité de contrôle d'énergies :** est responsable de répartir l'énergie disponible aux autres modules et de réduire les dépenses en mettant en veille les composants inactifs par exemple.

En plus de ses quatre composants principaux, un capteur peut contenir, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un **générateur d'énergie** pour les cellules solaires, un **système de localisation** GPS (Global Positioning System) ou un **système mobilisateur** chargé de déplacer les nœuds capteurs en cas de nécessité. La figure suivante représente l'architecture générale d'un nœud capteur où les unités supplémentaires sont représentées en pointillé.

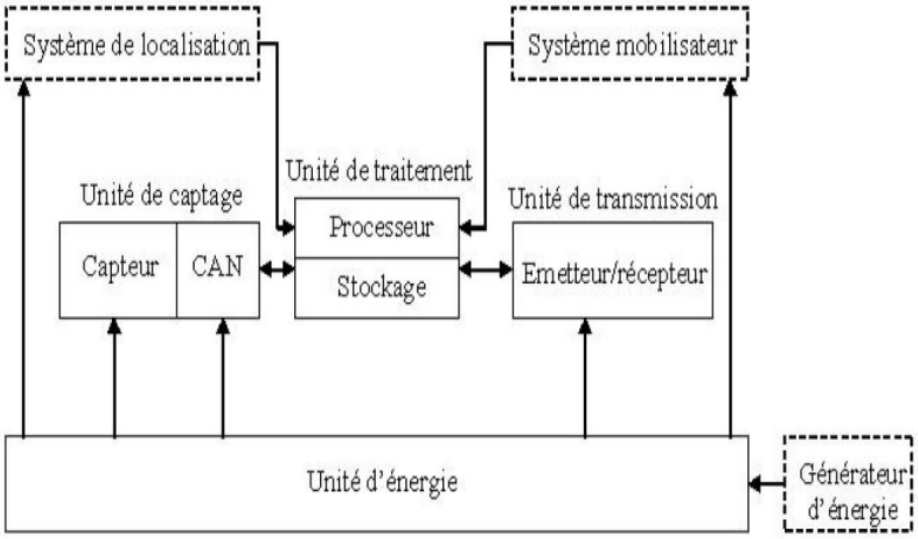


Figure 1. Architecture d'un nœud capteur

II.3. Types de réseaux de capteurs sans fil et mobile

L'avancement actuel des appareils intelligents avec les technologies sans fil [9] a développé de nouvelles perspectives dans le domaine des réseaux sans fil et a permis aux utilisateurs de communiquer de manière point à point indépendamment de l'heure et de l'emplacement. Un ensemble de dispositifs autonomes mobiles et/ou fixes prenant en charge la technologie sans fil peut être interconnecté via des liaisons sans fil pour former un réseau dynamique temporaire avec ou sans l'aide d'une administration centralisée ou d'un support fixe. Ces réseaux sans fil Ad hoc multi sauts (MAWN : Multipath Ad hoc Wireless Network) sont considérés comme des technologies clés pour fournir une grande variété d'Internet des objets (IoT).

Dans ce travail de recherche, on va voir d'une manière brève des différents types de réseaux des capteurs sans fil comme : les réseaux ad hoc ; les réseaux de capteurs sans fil (WSN : Wireless Sensor Network) ; les réseaux ad hoc mobiles (MANET : Mobile Ad hoc Network) ; les réseaux ad hoc pour les véhicules (VANET : Vehicular Ad hoc Network) ; les réseaux sans fil maillés (WMN : Wireless Mesh Network) et les réseaux sans fil médicaux (WBAN : Wireless Body Area Network).

II.3.1. Réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil (WSN) est un réseau sans fil et sans infrastructure fixe, dont sa topologie est dynamique c'est-à-dire que leurs nœuds sont auto configurée/auto organisée, qui est déployé avec un grand nombre de nœuds capteurs sans fil de manière ad hoc et qui est utilisé pour surveiller le système, les conditions physiques ou environnementales.

Les nœuds capteurs utilisés dans les WSN sont équipés des processeurs embarqués qui gèrent et surveillent l'environnement dans une zone particulière. Ils sont connectés à la station de base qui agit comme une unité de traitement des informations dans le système des réseaux WSN. La station de base (BS) ou un puit collecteur d'un système des réseaux WSN est connectée via Internet pour partager et analyser les données captées.

Un réseau de capteurs sans fil communément appelé en anglais Wireless Sensor Network ***(WSN)*** peut être caractérisé comme un système de dispositifs, indiqués comme des nœuds qui peuvent détecter l'environnement, traiter et transmettre les données accumulées à partir du champ surveillé (par exemple, une zone ou un volume) via des connexions à distance et sans fil. Il peut être décrit comme un système de nœuds qui détectent et peuvent contrôler agréablement l'environnement, permettant l'association entre les personnes ou les ordinateurs et l'environnement environnant. Les informations sont envoyées, éventuellement via différents sauts, à un puits ou point de collecte (indiqué comme contrôleur ou moniteur) qui peut les utiliser localement ou est associé à des différents systèmes (par exemple, Internet ou satellite) via un portail. Les nœuds peuvent être fixes ou mobiles. Quand les nœuds sont mobiles, le réseau des capteurs sans fil portera l'appellation d'un réseau mobile ad hoc MANET.

Actuellement un WSN est très utilisé dans différentes domaines d'applications comme : Internet des objets (IoT) ; la surveillance et le contrôle pour la sécurité et la détection des menaces ; la relevée de la température ambiante, l'humidité et la pression atmosphérique dans un environnement ; le niveau de bruit de l'environnement ; les applications médicales telles que la

surveillance des patients et la télémédecine ; l'agriculture et l'élevage intelligentes et la détection de glissement de terrain et des volcans.

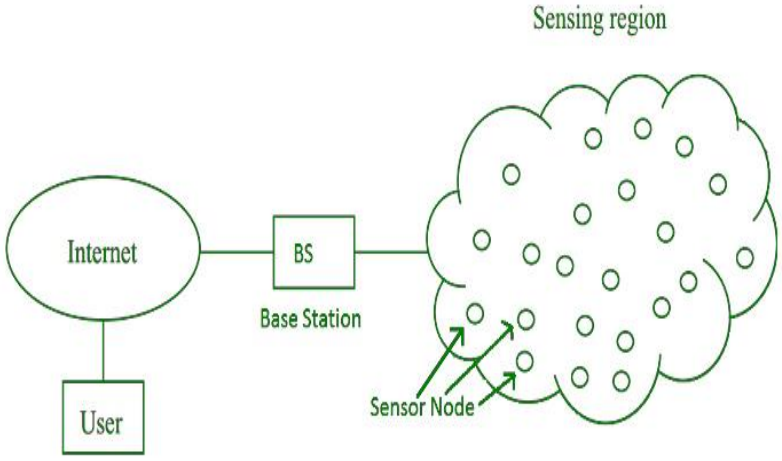


Figure 2. Architecture d'un WSN

II.3.2. Réseaux ad hoc sans fil

Les réseaux ad hoc sans fil sont des réseaux des capteurs distribués qui fonctionnent sans infrastructures fixes et dans lesquels chaque nœud du réseau est prêt à transmettre des paquets de données pour d'autres nœuds de réseau.

Les principaux domaines d'applications des réseaux ad hoc sans fil sont entre autres : Data Mining, Domaines Militaires (Military Battle Field), Environnement, Commerce (Commercial Sector) et les réseaux personnels (Personal area network or bluetooth and ZigBee). En plus, dans un réseau ad hoc sans fil les nœuds peuvent être fixe ou mobiles. C'est la raison pour laquelle les nœuds du réseau dotés d'une mobilité donnent naissances à un réseau ad hoc sans fil mobiles dénommé MANET (Mobile Ad Hoc Network).

Les principales caractéristiques des réseaux ad hoc sans fil sont les suivantes :

1) Les réseaux sans fil ad hoc sont des réseaux distribués qui n'ont pas besoin d'infrastructures fixes pour fonctionner. Dans un réseau ad hoc sans fil, les nœuds du réseau peuvent être déployés de manière aléatoire pour créer le réseau ad hoc.
2) Les nœuds du réseau devront transmettre les paquets réseaux aux autres nœuds du réseau. Dans un réseau ad hoc sans fil, les nœuds du réseau communiquent directement avec d'autres nœuds dans leurs limites. Lorsque les nœuds communiquent avec des nœuds du réseau en dehors de leurs plages, les paquets du réseau seront transmis par les nœuds du réseau à

proximité et d'autres nœuds qui se trouvent sur le chemin des nœuds sources aux nœuds de destination.

3) Les réseaux ad hoc sans fil sont des réseaux qui s'auto-organisent et s'auto configurent. Ils sont sans infrastructures fixes ni administration centrale, les réseaux ad hoc sans fil doivent être capables d'établir par eux-mêmes une coopération entre les nœuds. Les nœuds du réseau doivent également être capables de s'adapter aux changements du réseau, tels que la topologie du réseau, qui est dynamique.
4) Les réseaux ad hoc sans fil ont des topologies de réseaux dynamiques. Les nœuds d'un réseau ad hoc sans fil se connectent à d'autres nœuds de réseau via des liaisons sans fil. Les nœuds du réseau sont pour la plupart mobiles. La topologie d'un réseau ad hoc sans fil peut changer de temps à autre, car les nœuds du réseau se déplacent de la portée vers l'extérieur, et de nouveaux nœuds du réseau peuvent rejoindre le réseau, tout comme les nœuds du réseau existants peuvent quitter le réseau.

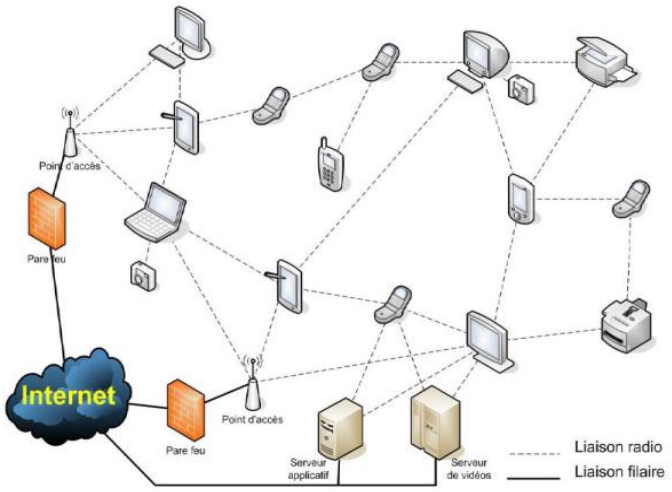


Figure 3. Architecture d'un réseau Ad hoc

II.3.3. Réseaux mobiles ad hoc MANET

MANET [10] signifie Mobile Ad hoc Network, également appelé réseau mobile sans fil Ad hoc ou réseau Ad hoc sans fil mobile, c'est un réseau basé sur la norme IEEE 802.15.4 et qui dispose généralement d'un environnement de réseau routable au-dessus de la couche liaison de données (Data Link Layer) d'un réseau ad hoc. Ils consistent en un ensemble de nœuds mobiles connectés sans fil dans un réseau auto-configuré, réseau d'auto-guérison sans avoir une infrastructure fixe. Les nœuds MANET sont libres de se déplacer de manière aléatoire car la topologie du réseau change

fréquemment. Chaque nœud se comporte comme un routeur lorsqu'il transfère le trafic vers d'autres nœuds spécifiés du réseau.

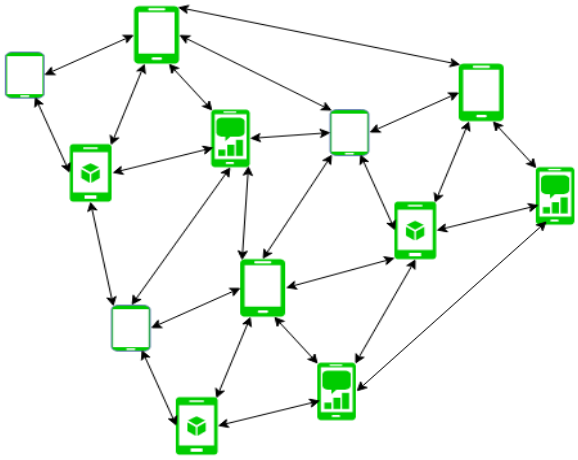


Figure 4. Architecture d'un MANET

Le réseau MANET peut fonctionner seul ou en tant qu'un composant d'internet plus vaste. Ils créent une topologie autonome et hautement dynamique avec un ou plusieurs émetteurs-récepteurs distincts placés entre les nœuds. Le défi fondamental pour le réseau MANET est d'équiper chaque dispositif pour qu'il puisse maintenir un accès permanent aux informations requises pour gérer le trafic de manière appropriée. Les réseaux MANET sont des réseaux point-à-point, auto-formés, auto-organisés et auto-réparateurs. En général, les réseaux MANET de 2000 à 2015 communiquent sur des fréquences radio (30 MHz-5 GHz). Ils peuvent être utilisés dans des applications de sécurité routière, notamment celles qui font appel à des capteurs pour l'environnement, la maison, la santé, les opérations de secours en cas de catastrophe, la défense aérienne, terrestre et maritime, les armes, la robotique, etc.

1) Caractéristiques de MANET :

Les principales caractéristiques des réseaux MANET sont les suivantes :

- **Topologies dynamiques :** la topologie du réseau qui est typiquement multi sauts peut changer de façon aléatoire et rapide avec le temps, elle peut former des liaisons unidirectionnelles ou bidirectionnelles ;
- **Bande passante limitée, liaisons à capacité variable :** les liaisons sans fil ont généralement une fiabilité, une efficacité, une stabilité et une capacité inférieure à celles d'un réseau câblé ;

- **Comportement autonome :** chaque nœud peut agir en tant qu'un hôte et routeur, ce qui montre son comportement autonome ;
- **Fonctionnement sous contrainte d'énergie :** comme certains ou tous les nœuds dépendent de batteries ou d'autres moyens épuisables pour leur énergie. Les nœuds mobiles se caractérisent par moins de mémoire, de puissance et de fonctionnalités légères ;
- **Sécurité limitée :** les menaces de sécurité touchent désormais aussi les réseaux MANET. En raison de la nature distribuée des opérations de sécurité, de routage et de configuration des hôtes, un pare-feu centralisé est absent dans ce type de réseau.
- **Moins d'interaction humaine :** ils sont autonomes de manière dynamique et auto-organisé par nature et ne nécessitent qu'une intervention humaine minimale pour configurer le réseau**.**

2) Avantages et inconvénients de MANET

Avantages :

- Séparation de l'administration centrale du réseau.
- Chaque nœud peut jouer les deux rôles, c'est-à-dire rôle d'un routeur et d'hôte montrant la nature autonome.
- Les nœuds à configuration et à réparation automatiques ne nécessitent aucune intervention humaine.
- Hautement évolutif et convient à l'expansion de plusieurs hubs de réseau.

Les inconvénients :

- Les ressources sont limitées en raison de diverses contraintes telles que le bruit, les conditions d'interférence, etc.
- Manque de facilités d'autorisation.
- Plus sujet aux attaques en raison d'une sécurité physique limitée.
- Latence élevée, c'est-à-dire qu'il y a un énorme retard dans le transfert de données entre deux nœuds endormis.
- La consommation énergétique dégrade la topologie, la durée de vie du réseau et la qualité de services réseaux.

II.3.4. Réseaux maillés sans fil

L'une des technologies émergentes du réseau sans fil est les réseaux maillés sans fil *(WMN : Wireless Mesh Network)*. Les nœuds d'un WMN incluent des routeurs maillés et des clients maillés.

Chaque nœud d'un WMN fonctionne à la fois comme un routeur et comme un hôte. Lorsqu'il s'agit d'un routeur, chaque nœud doit effectuer le routage et transférer les paquets pour les autres nœuds si nécessaires, par exemple lorsque deux nœuds ne sont pas à portée directe l'un de l'autre et lorsqu'une route vers une destination spécifique pour la livraison des paquets doit être découverte.

Les routeurs maillés peuvent être équipés de plusieurs interfaces sans fils, basées sur des technologies sans fil identiques ou différentes, et sont capables de relier différents réseaux. Les routeurs maillés peuvent également être classés comme routeurs maillés d'accès, routeurs maillés de dorsale ou routeurs maillés de passerelle. Les routeurs maillés d'accès permettent aux clients maillés d'accéder aux réseaux maillés ; les routeurs maillés de dorsale ***(Backbone)*** forment l'épine dorsale d'un réseau maillé ; et un routeur maillé de passerelle connecte la dorsale à un réseau externe.

Chaque client maillé n'a normalement qu'une seule interface réseau qui fournit une connectivité réseau avec d'autres nœuds. Les clients maillés ne sont généralement pas capables de relier différents réseaux, ce qui est différent des routeurs maillés.

Semblable à d'autres réseaux ad hoc, un réseau maillé sans fils peut s'auto-organiser. Ainsi, les nœuds peuvent établir et maintenir automatiquement la connectivité avec d'autres nœuds, sans intervention humaine. Les réseaux maillés sans fil peuvent être divisés en réseaux maillés de base et en réseaux maillés d'accès.

Tableau 1. La différence entre un réseau ad hoc sans fil et un réseau de capteurs sans fil

Réseau ad hoc sans fil	Réseau de capteurs sans fil
Le support de transmission utilisé dans les réseaux ad hoc sans fil est les ondes radio.	Les supports de transmission utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil sont les ondes radio, l'infrarouge, les supports optiques.
Les applications sont indépendantes du réseau utilisé	Les applications sont dépendantes du réseau utilisé
Le routage de saut à saut a lieu.	Un routage basé sur les requêtes (routage centré sur les données) ou basé sur l'emplacement a lieu.
Il est de type hétérogène.	Il est de type homogène.

Le modèle de trafic est point à point.	Le modèle de trafic est any-to-any, many-to-one, many-to-few, one-to-many.
Le routeur sans fil est utilisé comme dispositif d'interconnexion.	La passerelle de niveau application est utilisée comme dispositif d'interconnexion.
Le débit de données est élevé.	Le débit de données est faible.
Prend en charge les services communs.	Prend en charge des applications spécifiques.
Le déclenchement du trafic dépend des besoins de l'application.	Déclenché par la détection d'événements.
L'adresse IP est utilisée pour l'adressage.	Une adresse MAC unique locale ou une adresse IP spatiale est utilisée pour l'adressage.

II.4. Protocoles de routages dans des réseaux mobiles ad hoc sans fil MANET

II.4.1. Introduction

Le routage est une méthode d'acheminement d'informations vers la bonne destination à travers un réseau de connexion donné ; il consiste à assurer une stratégie qui garantit, à tout moment, un établissement de routes qui soient correctes et efficaces entre n'importe quelle paire de nœuds appartenant au réseau, ce qui assures l'échange de messages de façon continue.

Un protocole est un ensemble de règles et de procédures qui doivent être suivies afin d'envoyer et de recevoir des données sur un réseau. Il s'agit d'une méthode standard qui permet la communication entre des processus qui peuvent être exécutés sur des machines différentes. Il existe différents types de protocoles en fonction de ce que l'on attend de la communication. Certains protocoles, comme le protocole FTP, seront spécifiquement conçus pour l'échange de fichiers, tandis que d'autres seront utilisés pour gérer uniquement l'état de la transmission et la gestion des erreurs (le protocole ICMP en est un exemple).

Compte tenu des restrictions des réseaux ad hoc, il convient d'utiliser le minimum de contrôle, de mobilité, d'utilisation de la bande passante et de la consommation d'énergie lors de la construction des routes. Dans ce qui suit, on abordera brièvement les défis du routage et de la consommation d'énergie dans les réseaux ad hoc mobiles, ainsi que les différents mécanismes de routage qui ont été développés pour résoudre ces problèmes évoqués ci-haut.

II.4.2. Classification des protocoles de routage dans les réseaux MANET

Dans ce travail de mémoire, c'est la classification des protocoles de routages qui nous intéresse et qu'on maintient pour la suite car l'optimisation d'énergies se fait suivant la manière de création, de maintenance de routes et de balancement des charges lors de l'acheminement des données dans les réseaux MANET [11].

Dans ce cas, les protocoles de routage peuvent être classés en : **Proactif, Réactif** et **Hybride** comme le montre la figure suivante, illustrant le classement des différents types des protocoles de routages utiles dans les réseaux ad hoc mobiles et les réseaux de capteurs sans fils.

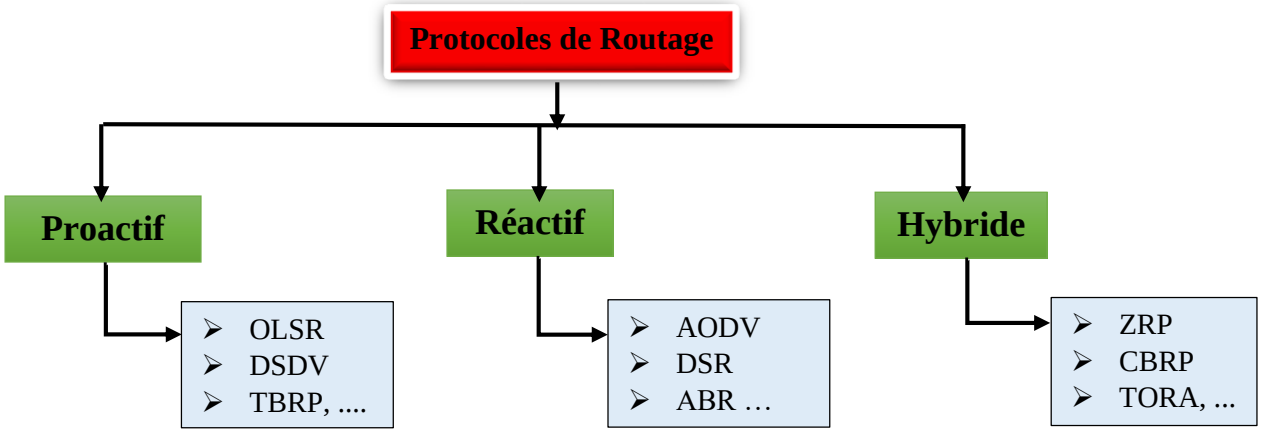


Figure 5. Protocoles de routage dans un réseau MANET

1) Protocoles de routage proactif

Les protocoles de routage proactifs essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles, qui peuvent représenter l'ensemble de tous les nœuds du réseau au niveau de chaque nœud du réseau. Les routes sont sauvegardées même si elles ne sont pas utilisées. La sauvegarde permanente des chemins de routage est assurée par un échange continu des messages de mise à jour des chemins. Les plus aboutis de ces protocoles sont : **OLSR**, **DSDV** et **TBR.**

2) Protocoles de routage réactif

Les protocoles les plus récents proposés pour assurer le service de routage dans les réseaux filaires sont les protocoles de routage réactif (également connus sous le nom de protocoles de routage à la demande). La majorité des solutions proposées au problème du routage dans les réseaux ad hoc qui sont actuellement évaluées par le groupe de travail MANETWG (Mobile Ad Hoc Networking Working Group) de l'IETF appartiennent à cette catégorie de protocoles de routage.

Ces types de protocoles de routage construisent et maintiennent des routes en fonction des besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte de route globale est lancée dans le but de collecter des informations, ce qui consomme une énergie énorme. Les plus connus de ces protocoles à l'heure actuelle sont **DSR** et **AODV**.

3) Protocoles de routage hybride

Avec ce type de protocoles, la connaissance de la topologie locale peut être maintenue jusqu'à un nombre prédéterminé de petites défaillances grâce à des échanges périodiques de suivi de contrôle, ou à des techniques proactives. En utilisant des paquets de requêtes distribuées, ou un schéma réactif, il est possible de trouver les chemins vers des nœuds plus éloignés. Dynamic Source Routing (DSR) est un exemple de protocoles de cette famille qui est réactif au départ mais qui peut être amélioré s'il adopte un comportement proactif. Les plus connus de ces protocoles sont **ZRP** et **CBRP.**

On va se focaliser à la suite de ce travail de recherche sur le protocole de routage proactif OLSR faisant partie du sujet.

II.4.3. Protocole de routage proactif OLSR

1) Définition

Optimized Link State Routing (OLSR) est un protocole de routage proactif à état des liens, conçu pour fonctionner dans un environnement mobile distribué sans aucune entité centrale le contrôlant et réagissant à la mobilité. Il est utilisé dans les réseaux mobiles Ad hoc MANET denses à faibles et à forte mobilité.

Il représente une adaptation et une optimisation de la consommation d'énergies basé sur son principe de routage à état de lien qui est le plus utile pour les réseaux mobiles ad hoc. Il permet d'obtenir les routes de plus court chemin et de faibles consommation énergétique grâce à l'algorithme de DIJIKSTRA et à un échange régulier des informations topologiques entre tous les autres nœuds du réseau à l'aide des messages Hello et TC.

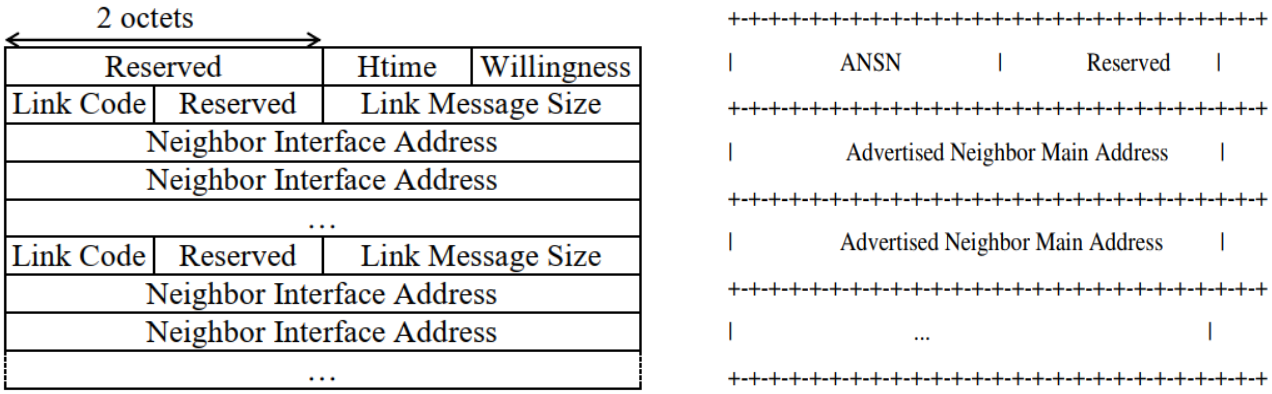
L'optimisation de la consommation d'énergie et du routage dépend du fait que chaque nœud dans un protocole OLSR déclare ses connexions directes à tous ses voisins à l'ensemble du réseau. En utilisant des relais multipoints MPR *(Multipoint Relay)*, les nœuds ne déclareront qu'une partie de leur voisinage dans le cas du protocole OLSR.

2) Format d'un paquet de données OLSR

Le protocole OLSR définit un format général d'un paquet de données, ce format est unique pour tous les messages circulant dans le réseau.

En plus des messages d'échange de contrôle de trafic **HELLO** et **TC** *(Topology Control)*, le protocole OLSR propose deux autres différents types de messages : **MID** *(Multiple Interface Declaration)* et **HNA** *(Host and Network Association).* [12].

L'état d'un lien et les données d'information sur les voisins à un saut sont données par **le message HELLO**, alors le format de ce message Hello ainsi que ses différents champs, est illustré sur la figure suivante **[Fig 6.a]**



a. Format d'un message HELLO

b. Format d'un message TC

Figure 6. Format du message HELLO et TC du protocole OLSR

- ***Reserved***: Ce champ réservé est toujours défini sur "0000000000000000" par défaut. Il est utilisé pour transmettre l'énergie résiduelle qui sera utile pour le voisin à un saut ou à deux saut lors de l'optimisation d'énergies avec les différent mécanismes d'OLSR.
- ***HTime:*** Ce champ spécifie l'intervalle d'émission HELLO utilisé par le nœud sur cette interface particulière, c'est-à-dire le temps défini avant la transmission du prochain message HELLO (cette information peut être utilisée dans la détection de lien avancée).
- ***Willingness***: ce champ spécifie la volonté d'un nœud de transporter et de transférer le trafic vers d'autres nœuds. Un nœud avec la volonté WILL_NEVER, ne doit jamais être sélectionné comme MPR par aucun nœud. Un nœud avec la volonté WILL_ALWAYS doit toujours être sélectionné comme MPR. Par défaut, un nœud est annoncé par défaut avec une volonté de WILL_DEFAULT.

Les informations relatives à la topologie sont reçues par un nœud à travers **un message TC** périodique utilisant le mécanisme de relais multipoint MPR. Le format d'un message TC était illustré sur la figure ci-après avec ses champs qui le composent **[Fig 6.b].**

Les message MID sont émis que par un nœud qui a des interfaces OLSR multiples, afin d'annoncer des informations sur la configuration de ses interfaces au réseau. Un message MID contient une liste d'adresses, *L'adresse* ***I_if_addr*** correspond à une interface ainsi que ***I_main_addr*** est l'adresse principale du nœud émetteur. La diffusion de ces messages se fait par les relais multipoints MPR afin de minimiser le nombre de messages circulants dans le réseau MANET/WSN.

Les messages HNA sont émis que par un nœud qui a des interfaces non-MANET multiples, dont le but est de fournir la connectivité d'un réseau OLSR à un réseau non OLSR. Un nœud passerelle émet des messages HNA contenant une liste d'adresses des réseaux associés et de leurs masques réseaux (Netmasks).

3) Gestion de voisinage avec OLSR : tables de voisinage

Avec OLSR, chaque nœud stocke et maintient quatre types de tables de voisinage : la table de voisinage à un saut, la table de voisinage à deux saut, la table des MPR et la table des sélecteurs MPR [13].

- La table de voisinage à un saut : chaque nœud maintient une table avec les champs suivants : *(N_neighbor_main_addr, N_status, et N_willingness)*. Le champ *N_neighbor_main_addr* affiche l'adresse principale du voisin, tandis que *N_status* spécifie l'état du voisin, qui peut être asymétrique *NOTSYM*, symétrique *SYM* ou Multipoint Relay MPR. La valeur du champ *N_willingness*, qui peut aller de 0 à 7 (par exemple, *WILL_NEVER, WILL_LOW, WILL_DEFAULT, WILL_HIGH* et *WILL_ALWAYS*), représente la propension du nœud à transmettre le trafic réseau à d'autres nœuds du réseau.

  Un nœud avec *N_willingness = WILL_NEVER (WILL_NEVER=0)* ne peut jamais être sélectionné comme MPR par un autre nœud. Un nœud avec *N_willingness = WILL_ALWAYS (WILL_ALWAYS=7)* doit toujours être choisi comme MPR. Le nœud doit être annoncé par défaut avec *N_willingness = WILL_DEFAULT (WILL_DEFAULT = 3).*
- Table de voisinage à deux sauts : comme il a été mentionné précédemment, un nœud stocke et maintient une table de voisinage à deux sauts constituée des champs suivants : *N_neighbor_main_addr*, *N_2hop_addr* et *N_time*. Cette table décrit les liens symétriques,

d'une part entre le nœud en question et ses voisins à un saut, et d'autre part entre ce nœud et ses voisins à de deux sauts.

N_neighbor_main_addr est l'adresse principale du voisin à un saut, *N_2hop_addr* est l'adresse principale du voisin à deux sauts avec un statut de voisinage SYM avec *N_neighbor_main_addr,* et *N_time* spécifient la durée de validité de cette entrée et doivent être supprimées de la table après son expiration.

- Table des voisins MPR : chaque nœud stocke et maintient une table des nœuds désignés comme MPR aux fins du voisinage. Chaque nœud MPR est identifié dans cette table par l'adresse principale de son voisin désigné par *N_neighbor_main_addr*.
- Table des sélecteurs MPR : chaque nœud stocke et maintient une table de ses sélecteurs MPR *(MPR Select)*. Cette table, décrivant les voisins qui ont élu le nœud comme MPR. Cette table possède les deux champs à savoir : *MS_main_addr* et *MS_time* où *MS_main_addr* est l'adresse principale d'un nœud qui a sélectionné le nœud comme MPR, tandis que *MS_time* spécifie la durée de validité de cette entrée et doit être supprimée de la table après expiration.
- La table des liens est construite à base des informations des liens vers les nœuds voisins. La construction de cette table s'effectue par l'échange des messages HELLO. Chaque nœud doit détecter les liens avec ses nœuds voisins. Ainsi, pour un nœud donné, un lien est décrit par son interface locale et l'interface du nœud distant avec lequel il va établir ce lien. Chaque nœud stocke et maintient les informations des liens vers les nœuds voisins sous forme d'une table constituée des champs suivants : *L_local_if_addr, L_neighbor_if_addr, L_SYM_time, L_ASYM_time et L_time.*

4) Algorithmes de sélection des Relais Multipoints MPR

Le cœur du principe d'optimisation dans le protocole OLSR est son mécanisme de diffusion des informations d'états de liens basé sur l'algorithme de sélection des relais multipoints (MPR). Les relais multipoints sont utilisés, pour diminuer le trafic dû à la diffusion des messages de contrôle provoquant des inondations dans le réseau Ad hoc [14]. L'ensemble des MPR est calculé heuristiquement à l'aide de l'algorithme suivant :

On note par :

- ***u*** un nœud du réseau Ad hoc
- ***N(u)*** l'ensemble des voisins symétriques de ***u***
- ***N2(u)*** l'ensemble des voisins à deux sauts de ***u***

- ***MPR(u)*** l'ensemble des MPR de ***u***

Ainsi, l'algorithme est décrit comme suit :

- Initialiser ***MPR(u)*** à l'ensemble vide.
- Identifier l'ensemble des nœuds de ***N(u)*** qui sont les seuls ayant un lien avec un des voisins de deux sauts. Ajouter ces nœuds à ***MPR(u)***, et éliminer de ***N2(u)*** tous les nœuds de second niveau couverts par ces derniers.
- ***Tant que N2(u)*** est non vide ***Faire***
  - ✓ Choisir un nœud ***v*** de ***N(u)*** qui couvre le maximum de nœuds de ***N2(u)***.
  - ✓ Insérer ***v*** dans l'ensemble des relais multipoint ***MPR(u)***, et éliminer de ***N2(u)*** tous les nœuds de deux sauts couverts par celui-ci.
- ***Fin Tant que***

Puisque chaque nœud *N* choisit son propre *MPR* comme il l'entend, le *MPR* de diffusion ne sera pas toujours le même ; ce groupe de *MPR* est appelé *MPR (N).* Par conséquent, un nœud qui a été désigné comme *MPR* garde la trace des nœuds qui l'ont choisi. Cette unité est connue sous le nom de "sélecteur de relais multipoint" *(MPR selector set).*

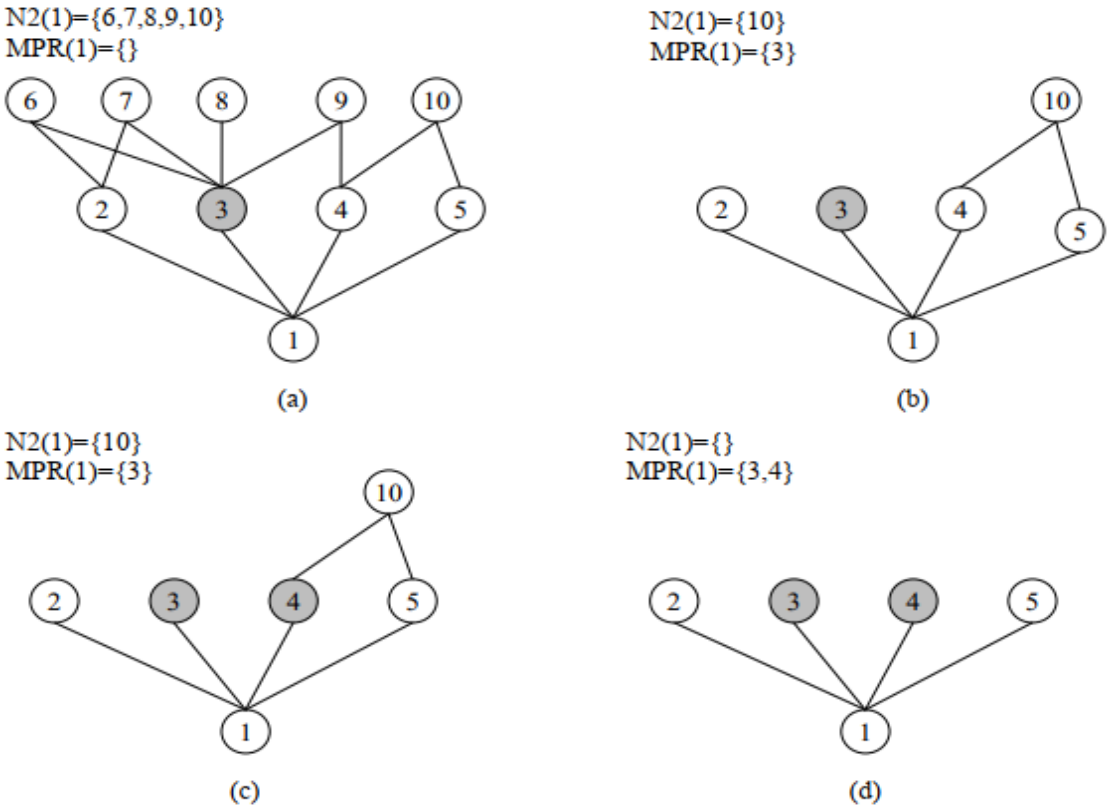


Figure 7. Exemple de la sélection des MPR

D'après l'étape (c) de cet exemple, le choix entre les nœuds 4 et 5 comme MPR est aléatoire, on aura alors deux solutions possibles ***: MPR (1) = {3,4}*** ou ***MPR (1) = {3,5}***

En plus selon l'OLSRv2, le mécanisme de sélection des nœuds MPR a été améliorée en prenant en compte la volonté des nœuds *(Willingness)* à travers le champ ***N_Villingness*** comme paramètre prioritaire lors de la sélection des MPR et le degré *D(x)* d'un voisin symétrique à un saut.

Avant de détailler cette amélioration de l'algorithme on note :

- ***u*** le nœud exécutant l'heuristique ;
- ***N(u)*** l'ensemble des voisins symétrique de ***u*** ;
- ***N2(u)*** l'ensemble des voisins à deux sauts de ***u***, avec exclusion selon les valeurs du champ *N_willingness* qui peuvent être *WILL_NEVER, WILL_LOW, WILL_DEFAULT, WILL_HIGH ou WILL_ALWAYS ;*
- ***D(y)*** est le degré d'un voisin symétrique *y* à un saut de ***u***
- ***MPR(u)*** l'ensemble des ***MPR*** de ***u***

Ainsi, l'algorithme de sélection des MPR améliorée est décrit comme suit :

- Insérer dans l'ensemble ***MPR(u)*** les nœuds membres de ***N(u)*** possédant comme *N_willingness= WILL_ALWAYS*
- Pour chaque nœud ***y*** membre de ***N(u)*** calculer son degré ***D(y)***.
- Identifier l'ensemble des nœuds de ***N(u)*** qui sont les seuls ayant un lien avec un des voisins de deux sauts. Insérer ces nœuds à ***MPR(u)***, et éliminer tous les nœuds de deux sauts couverts par ces derniers de ***N2(u)***. Par exemple, si un nœud ***b*** dans ***N2(u)*** est accessible à partir d'un seul lien symétrique via un nœud ***a*** dans ***N(u),*** alors insérer le nœud ***a*** à l'ensemble MPR.
- ***Tant que*** l'ensemble ***N2(u)*** est non vide ***Faire***
  - ✓ Pour chaque nœud dans ***N(u)***, calculer l'accessibilité, c'est-à-dire, le nombre de nœuds dans ***N2(u)*** qui ne sont pas encore couverts par aucun nœud de l'ensemble ***MPR(u)***, et qui sont accessibles à partir de ce nœud dans ***N(u)***.
  - ✓ Sélectionner comme MPR le nœud possédant le plus élevé *N_willingness* parmi les nœuds de ***N(u)*** qui possèdent une accessibilité non nulle.
    - Dans le cas de plusieurs choix, sélectionner le nœud qui fournit une accessibilité à un nombre maximal de nœuds dans ***N2(u)***.
    - Dans le cas où il y a plusieurs nœuds fournissant la même accessibilité, sélectionner comme ***MPR*** le nœud possédant le plus élevé degré ***D(y)***.
  - ✓ Supprimer les nœuds dans ***N2(u)*** qui sont maintenant couverts par le nœud inséré dans l'ensemble MPR.
- ***Fin Tant que***

Dans ce cas, l'exemple précédent admettra une seule solution ***MPR (1) = {3, 4}*** car ***D(4)=2>D(5) = 1 ,*** lorsqu'il y'a des nœuds avec un nombre d'accessibilité ***R(u)*** égal.

CHAP III. PROBLEME D'ENERGIES DANS LES RESAUX MANET

III.1. Introduction

Un nœud capteur sans fil ne peut être équipé que d'une source d'alimentation limitée ($< 0{,}5\ A\ h$; $1{,}2\ V$) en raison des nombreuses contraintes matérielles décrites qui sont très minimes à cause de sa taille. De plus, pour la plupart des applications, la reconstitution des ressources énergétiques est impossible. C'est la raison pour laquelle la consommation d'énergie dans les réseaux ad hoc et les réseaux de capteurs sans fil mobile MANET est un problème majeur du fait que la plupart des batteries équipées par ses capteurs ne sont pas ni rechargeable et ni remplaçable [14].

La durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil MANET montre donc une forte dépendance à la durée de vie de la batterie de ses nœuds capteurs. Ainsi, les sources qui consomment d'énergie pendant le fonctionnement de chaque nœud capteur doivent être analysées et entretenues efficacement. On va alors étudier dans les sections suivantes comment évaluer la consommation d'énergie dans des réseaux de capteurs sans fil MANET et les réseaux ad hoc, et voir aussi comment optimiser cette consommation dans le but d'étendre la durée de vie du réseau sans causer la dégradation de sa qualité de services [16].

III.2. Energies consommées pendant la détection ou la capture

L'unité de détection ***(****Sensing phase****)*** ou de capture et ses composants ont été présentés à la section parlant l'architecture d'un capteur sans fils [15]. La puissance de capture ou de détection varie selon la nature des applications et des capteurs spécifiques utilisés. La capture ou la détection sporadique peut consommer moins d'énergies que la surveillance constante des événements. La complexité de la détection des événements joue également un rôle crucial dans la détermination de la dépense énergétique. Des niveaux de bruit ambiant plus élevés peuvent entraîner une corruption importante et peuvent aussi augmenter la complexité de la capture ou de la détection.

La figure suivante montre les différentes sources de la consommation d'énergie dans un nœud capteur, qui sont entre autres les différents états d'un nœud à savoir : ***état inactif*** *(idle state),* ***état en veille*** *(sleep state)* et ***l'état actif*** *(active state)* qui définit les différents modes d'un nœud capteur dont **le mode de capture, de traitement, de transmission et de réception** de données.

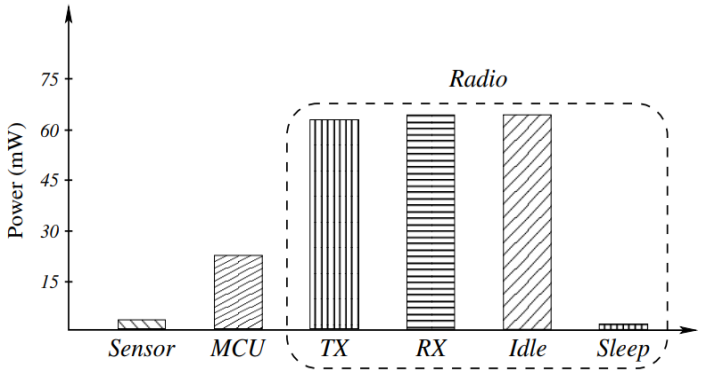


Figure 8. La répartition de la consommation énergétique d'un nœud MicaZ

La consommation énergétique d'un ADC dépend des performances de chacun de ces composants ; cependant, en général la puissance dissipée par un ADC dépend de deux facteurs majeurs [18] :

$$\boldsymbol{P \propto F_S . 2^{E_{NOB}}} \quad (\mathbf{1})$$

Où $\boldsymbol{F_S}$ est le taux d'échantillonnage et $\boldsymbol{E_{NOB}}$ est le nombre effectif de bits.

III.3. Energies consommées pendant le traitement des données

Selon l'architecture d'un capteur sans fils, la partie Traitement de données *(Data Processing)* joue un rôle important de traiter et de stocker les informations détectées ou reçues par un capteur. Par conséquent, la consommation d'énergie pendant le traitement des données (Ep) pour une seule tâche peut être représentée comme une somme de deux composantes comme suit [21] :

$$\boldsymbol{E_P = N \times C \times V_{dd}^2 + V_{dd} \times \left(I_0 \times e^{V_{dd}/n \times V_{Th}}\right) \times (N/f)} \quad (\mathbf{2})$$

Où le premier terme est la dissipation d'énergie résultante des commutateurs à transistors et $\boldsymbol{N}$ est le nombre de cycles d'horloge par tâche, $\boldsymbol{C}$ est la capacité de commutation totale et $\boldsymbol{V_{dd}}$ est la tension d'alimentation. Le deuxième terme est la perte de puissance due aux courants de fuite, où $\boldsymbol{I_0}$ est le courant de fuite, $\boldsymbol{n}$ est une constante liée au matériel du processeur, $\boldsymbol{V_{Th}}$ est la tension de seuil et $\boldsymbol{f}$ est la fréquence d'horloge**.**

D'autre part, la durée de la portée dépend également de la tension d'alimentation comme suit [19, 21] :

$$\boldsymbol{T_g = \frac{V_{dd}}{K \times (V_{dd} - V_{Th})^a}} \quad (\mathbf{3})$$

Où $\boldsymbol{K}$ et $\boldsymbol{a}$ sont des variables dépendantes du microprocesseur avec $\boldsymbol{a \cong 2.}$

Si le microprocesseur fonctionne à une fréquence d'horloge $\boldsymbol{f}$, cela correspond à une durée de commutation de portée pour chaque $\boldsymbol{T_0 = 1/f}$ secondes pendant lesquelles le processeur a une seule tâche à traiter. Si la durée de portée $\boldsymbol{T_g}$, est bien inférieur à la durée de commutation de portée $\boldsymbol{T_0}$, alors le processeur est maintenu inactif à partir du moment où la tâche est terminée jusqu'au moment où la tâche suivante est affectée. Par conséquent, la durée de portée peut être augmentée en diminuant la tension d'alimentation selon la formule précédente de sorte que $T_g \leq \boldsymbol{T_0}$ [21]. On aura alors l'expression de la fréquence d'horloge suivante :

$$\boldsymbol{f \leq \frac{K \times (V_{dd} - V_{Th})^a}{V_{dd}}} \quad (\mathbf{4})$$

III.4. Energies consommées pendant la communication

Chaque nœud capteur dans un réseau ad hoc mobile MANET et réseaux de capteurs sans fil doit communiquer avec les autres car il joue à la fois le rôle d'un routeur et d'un hôte c'est-à-dire qu'il reçoit et envois les données vers leurs destinations. En plus un nœud capteur dans le réseau puisse avoir des différents états à savoir état actif (active) ou état en veille (sleep). On va alors voire par la suite comment l'énergie est consommée pendant cette phase de communication.

Pour une paire émetteur-récepteur, la consommation énergétique pendant la communication de données $\boldsymbol{Pc}$, est une combinaison de la puissance consommée par ces composants et peut simplement être modélisée comme :

$$\boldsymbol{P_C = P_0 + P_{tx} + P_{rx}} \quad (\mathbf{5})$$

Où $\boldsymbol{P_o}$ est la puissance d'émission ou de sortie et $\boldsymbol{P_{tx}}$ et $\boldsymbol{P_{rx}}$ sont respectivement la puissance consommée dans le circuit électronique de l'émetteur et du récepteur.

III.4.1. Consommation d'énergies au démarrage

L'énergie consommée par un nœud lors du démarrage $\boldsymbol{E_{st}}$ *(Energy for starting)***,** peut être modélisée comme suit [22] :

$$\boldsymbol{E_{st} = P_{LO} \times T_{st}} \quad (\mathbf{6})$$

Où $\boldsymbol{P_{LO}}$ est la puissance consommée par le circuit électronique d'émetteur-récepteur y compris le synthétiseur et le $\boldsymbol{VCO}$; $\boldsymbol{T_{st}}$ est le temps nécessaire pour démarrer tous les composants de l'émetteur-récepteur.

III.4.2. Consommation d'énergie pendant la commutation

Dans un réseau ad hoc MANET ou réseau de capteurs sans fil, la commutation est une phase durant laquelle un nœud passe d'un mode en un autre par exemple de l'état veille à l'état actif ou du mode émission au mode de réception. Dans cette phase un nœud consomme une énergie plus importante à prendre en considération quand on veut étendre la durée de vie du réseau. Cette énergie est appelée $\boldsymbol{E_{sw}}$ *(Energy Switching)* et est donnée par la formule suivante:

$$\boldsymbol{E_{sw} = P_{LO} \times T_{sw}} \quad (\mathbf{7})$$

Où $\boldsymbol{T_{sw}}$ est le temps de commutation et $\boldsymbol{P_{LO}}$ est la puissance consommée par le circuit électronique d'émetteur-récepteur y compris le synthétiseur comme nous l'avons vu dans la section précédente. Enfin, la consommation d'énergie pour les modes de réception et d'émission sera représentée dans les sections suivante.

1) Energie consommée en mode réception

En mode réception, l'émetteur-récepteur utilise le synthétiseur, le ***VCO,*** l'amplificateur à faible bruit, le mélangeur, l'amplificateur à fréquence intermédiaire et les composants du démodulateur. Étant donné que la consommation d'énergie du synthétiseur et du ***VCO*** est désignée par $\boldsymbol{P_{LO}}$, la consommation d'énergie lors de la réception est donnée par [22].

$$\boldsymbol{E_{rx} = (P_{LO} + P_{RX})T_{rx}} \quad (\mathbf{8})$$

Où $\boldsymbol{P_{RX}}$ est la puissance électrique des composants actifs restants, qui est constante pour les valeurs de débit de données utilisées pour les WSN/MANET, et $\boldsymbol{T_{rx}}$ est le temps nécessaire pour recevoir un paquet.

2) Energie consommée en mode émission

Lorsque l'émetteur-récepteur est commuté en mode émission, en plus du synthétiseur de fréquence et du $\boldsymbol{VCO}$, il utilise le modulateur et l'amplificateur de puissance. La consommation d'énergie du modulateur étant négligeable et la consommation d'énergie lors de la transmission des paquets de données est donnée par la formule suivante :

$$\boldsymbol{E_{tx} = (P_{LO} + P_{PA})T_{tx}} \quad (\mathbf{9})$$

Où $\boldsymbol{P_{PA}}$ est la puissance électrique consommée par l'amplificateur de puissance.

Contrairement à la consommation d'énergie en mode réception, qui est constante, la consommation d'énergie en émission varie avec la puissance d'émission, c'est-à-dire la puissance de sortie d'un

amplificateur RF. Lorsque le niveau de puissance de sortie d'un amplificateur RF souhaité est augmenté par le logiciel système, l'amplificateur de puissance consomme plus d'énergie, ce qui augmente la consommation d'énergie dans un amplificateur de puissances.

Par conséquent :

$$\boldsymbol{P_{PA} = \frac{1}{\eta} P_{out}} \qquad (\mathbf{10})$$

Où $\boldsymbol{\eta}$ est le rendement énergétique de l'amplificateur de puissance et $\boldsymbol{P_{out}}$ est le niveau de puissance de sortie d'un amplificateur RF souhaité.
A titre d'exemple, pour le nœud capteur MicaZ [17], l'émetteur-récepteur consomme $\mathbf{52,2\ mW}$ et $\mathbf{33\ mW}$ pour une puissance de sortie RF de $\mathbf{0\ dBm}$ et $\mathbf{-10\ dBm}$, respectivement.

Le niveau de puissance de sortie d'un amplificateur RF est généralement contrôlé par des protocoles de couche supérieure tels que le MAC ou des protocoles de routage pour fournir un succès de communication acceptable à une distance donnée $\boldsymbol{d}$. Ainsi, la puissance consommée par l'amplificateur de puissance peut également s'écrire en fonction de cette distance $\boldsymbol{d}$ comme suit [22] :

$$\boldsymbol{P_{PA} = \frac{1}{\eta} \times \gamma PA \times r \times d^n} \qquad (\mathbf{11})$$

Où $\boldsymbol{r}$ est le débit de données, $\boldsymbol{n}$ est l'exposant de perte de chemin du canal et $\boldsymbol{\gamma PA}$ est un facteur qui dépend des gains d'antenne, de la longueur d'onde, de la densité spectrale de puissance du bruit thermique, ainsi que du rapport signal sur bruit ***(SNR)*** souhaité à la distance $\boldsymbol{d}$.

Selon les définitions ci-dessus, un modèle détaillé de l'énergie consommée dans la communication peut être dérivé. Alors pour un cycle de communication, dans lequel un nœud transmet un paquet à un nœud voisin et reçoit en retour une réponse, comprenant l'énergie de démarrage de l'émetteur-récepteur, de la transmission de paquets, du passage du mode émission au mode réception et de la réception de paquets.

Par conséquent, la consommation d'énergie globale peut être donnée [22] comme la somme d'énergies consommées au démarrage *(Start :* $\boldsymbol{E_{st}}$*)*, à la commutation d'état *(Switching :* $\boldsymbol{E_{sw}}$*)*, à la transmission *(*$\boldsymbol{E_{tx}}$*)* et à la réception *(*$\boldsymbol{E_{rx}}$*)*. On aura alors :

$$\boldsymbol{E_c = E_{st} + E_{rx} + E_{sw} + E_{tx}}$$

$$E_C = \boldsymbol{P_{LO} \times T_{st} + (P_{LO} + P_{RX})T_{rx} + P_{LO} \times T_{sw} + (P_{LO} + P_{PA})T_{tx}} \quad (12)$$

En supposant que les durées d'émission et de réception peuvent être représentées par $\boldsymbol{T_{rx} = T_{tx} = l_{PKT}/r}$, où $\boldsymbol{l_{PKT}}$ est la longueur d'un paquet de données, et en utilisant la formule $\boldsymbol{P_{PA} = \frac{1}{\eta} \times \gamma PA \times r \times d^n}$ **.** La consommation d'énergie globale sera :

$$\boldsymbol{E_C = P_{LO}(T_{st} + P_{sw}) + (2P_{LO} + P_{RX})\frac{l_{PKT}}{r} + \frac{1}{\eta}.\gamma PA.d^n T_{tx} \times l_{PKT}} \quad (13)$$

III.5. Modèle énergétique simplifié

La figure suivante représente le modèle énergétique simplifié *(simplified energy model)* illustrant les composants d'un nœud capteur, qui consomment autant d'énergie durant la phase de traitement de données dans un réseau MANET ou WSN.

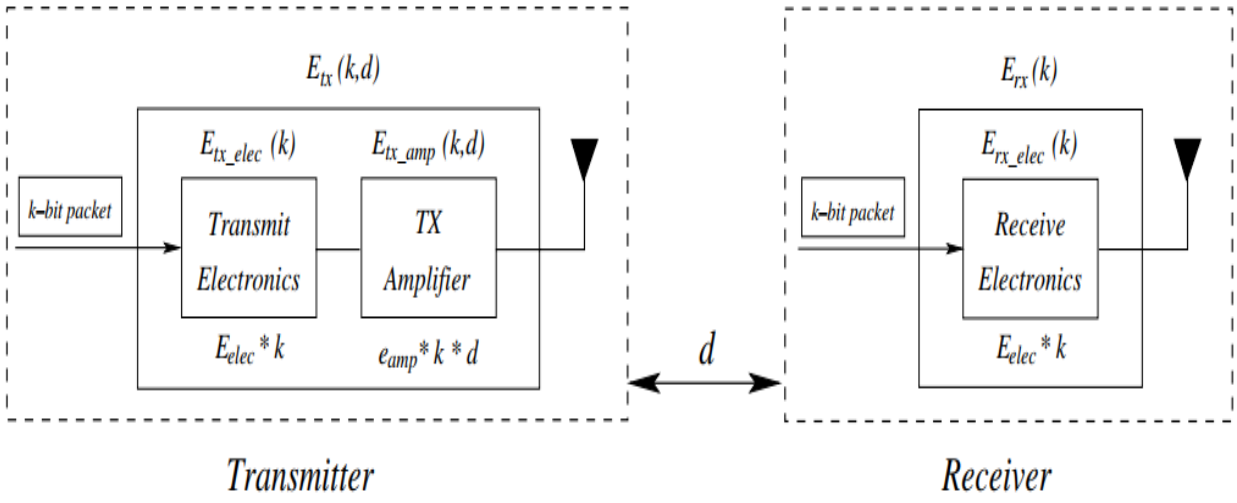


Figure 9. Modèle énergétique simplifié

Le modèle de consommation d'énergie peut être simplifié pour un couple émetteur-récepteur séparé par une distance $\boldsymbol{d}$ comme suit :

$$\boldsymbol{E_C = E_{TX}(k,d) + E_{RX}(k)} \quad (14)$$

Où $\boldsymbol{E_{TX}(k,d)}$ et $\boldsymbol{E_{RX}(k)}$ sont respectivement la consommation d'énergie dans le circuit d'émetteur et du récepteur et $\boldsymbol{k}$ est le nombre de bits dans un paquet de données.

Ce modèle simplifié est illustré à la figure ci-dessus pour le couple émetteur-récepteur. En revanche, la consommation d'énergie au niveau de l'émetteur est divisée entre le circuit électronique d'émission

et l'amplificateur de l'émetteur tandis que la consommation d'énergie du récepteur dépend uniquement d'un circuit électronique du récepteur.

Ensuite, les consommations énergétiques de l'émetteur et du récepteur sont respectivement suivantes :

$$\boldsymbol{E_{TX}(k,d) = E_{TX-elect} \times k + e_{amp} \times k \times d^n} \quad (\mathbf{15})$$

On aura alors :

$$\boldsymbol{E_{TX}(k,d) = \begin{cases} E_{TX-elect} \times k + e_{amp} \times k \times d^4, & d \geq d_0 \\ E_{TX-elect} \times k + e_{amp} \times k \times d^2, & d < d_0 \end{cases}} \quad (\mathbf{16})$$

Avec

$$\boldsymbol{d_0 = \frac{E_r}{E_i}} \quad (\mathbf{17})$$

Où $\boldsymbol{d_0}$ est le seuil de distance**,** $\boldsymbol{E_r}$ est l'énergie résiduelle d'un nœud capteur dans le réseau MANET ou WSN et $\boldsymbol{E_i}$ est l'énergie totale d'un nœud capteur ou énergie initiale que le nœud capteur ait avant son utilisation dans le réseau.

$$\boldsymbol{E_{RX}(k) = E_{RX-elect} \times k} \quad (\mathbf{18})$$

Avec $\boldsymbol{E_{TX-elect}}$ et $\boldsymbol{E_{RX-elect}}$ sont respectivement l'énergie consommée par bit pour les circuits d'émetteur et du récepteur respectivement, et $\boldsymbol{e_{amp}}$ est l'énergie consommée par bit et par distance pour l'amplificateur de puissance.

CHAP IV. OPTIMISATION D'ENERGIES DANS UN RESEAU MANET OU WSN

Dans un réseau MANET ou WSN, la contrainte de la consommation d'énergie est à prendre beaucoup en considération car c'est elle qui détermine la durée de vie du réseau ainsi que son performance. Car plus un nœud capteur traite autant d'informations, plus il consomme beaucoup d'énergie et plus il sera mort plus tôt, c'est pourquoi l'optimisation de la consommation d'énergie est tellement importante dans le but d'assurer l'équilibrage des charges entre les nœuds du réseau ainsi que le choix du chemin le plus court en se basant sur l'énergie résiduelle des nœuds participant à la construction des routes. Il en existe d'autres paramètres et métriques de base nécessaire à prendre en considération lors de l'optimisation de la consommation d'énergie dans un réseau MANET ou WSN qu'on va voir dans les sections suivantes.

IV.1. Modèle de la batterie

La batterie est l'une des parties d'un nœud capteur et fournit l'énergie (la tension et le courant) pour les autres composants matériels d'un nœud (par exemple, les interfaces radio, le processeur, le convertisseur ADC, l'émetteur-récepteur et le noyau de détection) [24, 25]. La consommation totale d'énergie de la batterie par cycle est la suivante :

$$\boldsymbol{E_{Cycle} = E_{Trans} + E_{CPU} + E_{DC} + E_{Bat}} \qquad (\mathbf{19})$$

Où $\boldsymbol{E_{Trans}}$, $\boldsymbol{E_{CPU}}$ et $\boldsymbol{E_{DC}}$ sont l'énergie consommée par les circuits d'émetteurs-récepteurs radio, du processeur et du convertisseur DC-DC, respectivement ; et $\boldsymbol{E_{Bat}}$ désigne la perte d'efficacité de la batterie.

On utilise le modèle linéaire de batteries pour estimer la batterie résiduelle *(RB)* des nœuds en fonction de deux paramètres principaux ; l'intervalle de surveillance de la charge de la batterie et la valeur de la capacité pleine de la batterie, alors le nombre de nœuds morts et l'énergie résiduelle moyenne de la batterie font partie des mesures qui peuvent être obtenues à partir de ce modèle dans notre schéma.

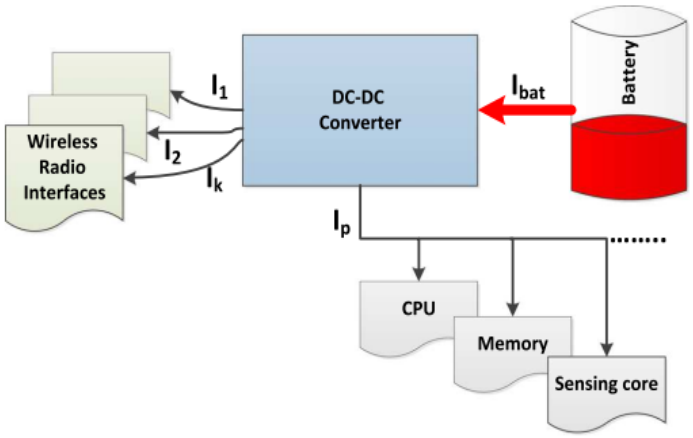


Figure 10. Bloc de niveau d'un système de batteries intelligentes

IV.2. Durée de vie d'un réseau

Le modèle de la durée de vie d'un nœud *(Network Lifetime)* a été implémenté en se basant sur les modèles d'énergie et de la batterie. Plus la durée de vie des nœuds est élevée, plus la durée de vie du réseau sera longue, connaissant que la durée de vie d'un nœud est relative à la durée de vie de sa batterie. Si tous les nœuds ont les mêmes niveaux d'énergie initiale, le nœud qui meurt en premier sera celui qui épuise l'énergie de sa batterie avec le taux de consommation d'énergie le plus élevé ***(The highest Drain Rate : DR)*** [26].

Pour mesurer le taux de consommation d'énergie d'un nœud $\boldsymbol{i}$ par seconde à un instant $\boldsymbol{t}$, chaque nœud surveille en permanence sa consommation d'énergie et son niveau de batterie résiduelle en utilisant respectivement son modèle d'énergie et son modèle de batterie [27]. Dans ce cas, l'énergie totale consommée est calculée comme défini dans la formule précédente, ensuite le taux de consommation d'énergie est déterminé comme suit :

$$\boldsymbol{DR_i(t) = \frac{300 \times E_{total-C}}{V \times T}} \qquad \boldsymbol{(20)}$$

Où $\boldsymbol{DR_i}$ à un instant $\boldsymbol{t}$ est le taux de consommation énergétique d'un nœud $\boldsymbol{i}$ en $\boldsymbol{mAh/s}$, $\boldsymbol{T}$ est la durée de service en $\boldsymbol{Sec}$, $\boldsymbol{E_{total-C}}$ est l'énergie totale consommée en $\boldsymbol{mWh}$ et $\boldsymbol{V}$ est la tension d'alimentation en $\boldsymbol{Volts}$, qui est défini dans le modèle énergétique générique implémenté sur $\boldsymbol{6,5V}$ comme valeur par défaut dans un simulateur **EXata Network Simulator or Emulator** par exemple.

Par conséquent, la durée de vie de chaque nœud *i* peut être estimée comme le rapport entre la batterie résiduelle, qui est obtenue périodiquement à partir du modèle de batterie linéaire, et le taux de consommation énergétique du nœud $\boldsymbol{i}$ tel qu'obtenu à partir de la formule précédente, comme suit

$$\boldsymbol{LT_i(t) = \frac{RB_i(t)}{DR_i(t)}} \qquad (\mathbf{21})$$

Où $\boldsymbol{LT_i}$ est la durée de vie estimée d'un nœud $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{RB_i}$ est la batterie résiduelle d'u nœud $\boldsymbol{i}$ et $\boldsymbol{DR_i}$ est le taux de consommation énergétique d'un nœud $\boldsymbol{i}$ à un instant $\boldsymbol{t}$.

Cependant, si le taux de consommation énergétique d'un nœud est « **0** », alors la durée de vie est supposée être une valeur maximale. Dans la plupart des fois, on définit la durée de vie maximale du nœud sur "$\mathbf{65535}$" similaire à [27]. Afin de prolonger la durée de vie d'un réseau, on essaiera de prolonger la durée de vie de chaque nœud capteur du réseau. Par conséquent, les métriques de sensibilisation à l'énergie et de la qualité de service QoS sont des meilleures considérations pour y parvenir.

La valeur métrique de la durée de vie d'un nœud a été utilisée dans le mécanisme de sélection EA-MPR développé par MBQA-OLSRv2, qui sera décrit dans la suite de ce travail de recherche.

IV.3. Mobilité d'un nœud capteur

Dans les réseaux mobiles ad hoc sans fil MANET ainsi que dans les réseaux WSN, la mobilité d'un nœud peut être modélisée par deux paramètres principaux, à savoir la vitesse et le temps de pause. La mobilité dans n'importe quel scénario de réseau sans fil entraîne des changements topologiques, ce qui augmente la surcharge de routage par le mécanisme de découverte de routes et le taux d'échec des liaisons. Le modèle de point de chemins aléatoire (RWP) est couramment utilisé pour la modélisation de la mobilité des nœuds dans les simulations de réseau en raison de sa simplicité. Les vitesses maximales et minimales de chaque nœud peuvent être configurées avec sa durée de pause pour simuler des scénarios de déploiement réels avec des nœuds à haute, moyenne et basse vitesse. Dans certains scénarios, les nœuds sont déployés sans aucun modèle de mobilité pour simuler des scénarios statiques. La vitesse instantanée d'un nœud, qui varie entre les vitesses minimales et maximales, est prise en compte dans certaines solutions d'optimisation lors de l'estimation de la métrique MCNR pour classer les nœuds participant à l'acheminement des paquets de données et à l'inondation du trafic de contrôle.

IV.4. Métriques de rangs multicritères d'un nœud MCNR

Ce paramètre de la métrique multicritère de rang d'un nœud *(MCNR : Multi-Criteria Node Rank metric)* est très important lors de l'optimisation d'énergie dans les réseaux mobiles ad hoc sans fil MANET car elle est basée sur les principales métriques d'un nœud a considéré lors de l'optimisation d'énergie comme : ***la batterie résiduelle*** *(residual battery),* ***la durée d'inactivité*** *(Idle time duration),* ***longueur de la file d'attente (queue length)*** *et* ***la mobilité*** *(mobility)* dans le but d'augment la durée de vie du réseau [28, 29].

On va définir ces quatre rangs de nœuds individuels en fonction des métriques liées aux nœuds impliqués : le rang de nœud basé sur la batterie résiduelle [$\boldsymbol{NR_{RB\ (i)}}$], le rang de nœud basé sur la durée d'inactivité [$\boldsymbol{NR_{Tidle}\ (i)}$], le rang de nœud basé sur la longueur de la file d'attente [$\boldsymbol{NR_{QL(i)}}$] et le rang de nœud basé sur la mobilité ***(NR_{mob}).***

IV.4.1. Rang d'un nœud basé sur la batterie résiduelle

Cette métrique peut être obtenue à partir du modèle de batterie utilisé et elle est utilisée pour déterminer le rang d'un nœud sur base de sa batterie résiduelle $\boldsymbol{NR_{RB\ (i)}}$ en utilisant la formule suivante. Un nœud avec une batterie résiduelle plus élevée correspond à un $\boldsymbol{NR_{RB\ (i)}}$ plus élevé, ce qui conduit à un épuisement d'énergie plus faible et à un rang MCNR plus élevé.

$$\boldsymbol{NR_{RB(i)} = NR_{max} * \frac{RB_i}{RB_{max}}} \qquad (22)$$

Où $\boldsymbol{RB_i}$ est l'énergie résiduelle instantanée de la batterie d'un nœud $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{R_{Bmax}}$ est la capacité maximale de la batterie, qui fait référence au niveau d'énergie initiale de la batterie du nœud, et $\boldsymbol{NR_{max}}$ est la valeur maximale de la métrique de rang d'un nœud MCNR.

IV.4.2. Rang d'un nœud basé sur la durée d'inactivité

Sur une période de temps $\boldsymbol{T_{total}}$, le modèle énergétique estime la durée pendant laquelle chaque nœud $\boldsymbol{i}$ a été passé à l'état inactif $\boldsymbol{T_{idle}}$ en tant que pourcentage du temps total écoulé $\boldsymbol{T_{total}}$comme présenté dans les formules suivantes. Ensuite, la valeur de $\boldsymbol{T_{idle}\ (i)}$ est utilisée pour déterminer le rang d'un nœud sur base de la durée de temps d'inactivité $\boldsymbol{NR_{Tidle\ (i)}}$ pour le nœud $\boldsymbol{i}$, comme indique la formule suivante :

$$\boldsymbol{T_{total}(i) = t_{trans} + t_{rec} + t_{idle} + t_{sleep}} \qquad (23)$$

$$\boldsymbol{T_{idle}(i) = 100 * \frac{t_{sleep}}{T_{total}(i)}\%} \qquad (24)$$

$$\boldsymbol{NRT_{idle}(i) = NR_{max} * \frac{T_{idle}(i)}{MT_{idle}}} \quad (25)$$

Où $\boldsymbol{T_{idle}}$ $(\boldsymbol{i})$ est la durée estimée instantanée du temps d'inactivité d'un nœud $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{MT_{idle}}$ est la durée maximale d'inactivité $\boldsymbol{T_{idle}}$ d'un nœud $\boldsymbol{i}$ et $\boldsymbol{NR_{max}}$ est la valeur maximale de la métrique d'un rang MCNR d'un nœud.

IV.4.3. Rang d'un nœud basé sur la longueur de la file d'attente

La valeur de la métrique *QL* spécifie qu'une valeur instantanée correspond aux délais moyens de mise en file d'attente. La valeur estimée du *QL* pour le nœud i est associée à la taille de chaque file d'attente prioritaire de sortie en octets obtenue à partir du modèle de longueur de la file d'attente mis en œuvre. Le nœud avec une taille *QL* nulle doit avoir la plus grande chance d'être sélectionné comme élément dans les chemins optimaux car le rang d'un nœud qui est basé sur la longueur de la file d'attente $\boldsymbol{NR_{QL(i)}(i)}$, est inversement proportionnel à la taille *QL*. Par conséquent, la valeur complémentaire de QL est utilisée pour calculer le $\boldsymbol{NR_{QL(i)}(i)}$ comme suit :

$$\boldsymbol{NR_{QL(i)}(i) = NR_{max} * \left(1 - \frac{QL_i}{QL_{max}}\right)} \quad (26)$$

Où $\boldsymbol{QL_i}$ est le nombre instantané d'octets dans la file d'attente de sortie pour un nœud $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{QL_{max}}$ est la longueur maximale de la file d'attente en octets et $\boldsymbol{NR_{max}}$ est la valeur maximale de la métrique de rang MCNR d'un nœud.

IV.4.4. Rang de nœud basé sur la mobilité

On considère la mobilité d'un nœud pour estimer la métrique MCNR. Cette valeur est obtenue à partir du modèle de mobilité RWP sur base de la vitesse instantanée d'un nœud i $\boldsymbol{S_{mob}(i)}$ comme suit :

$$\boldsymbol{NR_{mob}(i) = \frac{1}{S_{mob}(i)}} \quad (27)$$

$\boldsymbol{NR_{mob}(i)}$ est utilisé avec d'autres métriques pour estimer la valeur MCNR(i) d'un nœud i comme indiqué dans la suite où on trouve la valeur du rang d'un nœud mobile basé sur sa mobilité après avoir introduit la valeur du rang relative aux paramètres du poids, de la batterie résiduelle, de la durée d'inactivité et de la longueur de la file d'attente.

Dans un premier cas, on va faire une étude d'un réseau ad hoc statique là où le nœud est statique (c'est-à-dire pas de mobilité $\boldsymbol{S_{mob} = 0}$) et que la durée de vie d'un nœud est supérieure à la valeur du seuil minimale, alors l'équation suivante est utilisée ; sinon, $\boldsymbol{NR(i)}$ est mis à ''0''. On a alors :

$$\boldsymbol{MCNR(i) = w1 * NR_{RB}(i) + w2 * NRT_{idle}(i) + w3 * NR_{QL}(i)} \qquad (28)$$

Où ***w1, w2 et w3*** sont les facteurs de pondération (poids) normalisés des rangs des nœuds. Les facteurs de pondération normalisés avec leur somme, qui est égale à « 1 », indiquent l'importance des composantes de la métrique MCNR, d'où on prend alors par exemple que ***w1 = 0,40, w2 = 0,30 et w3 = 0,30*** pour mieux faire l'estimation et la surveillance de la métrique MCNR d'un nœud i du réseau.

Deuxièmement si le réseau ad hoc est constitué des nœuds mobiles avec une vitesse ***Smob*** non nulle, alors l'équation suivante n'est utilisée que si la durée de vie d'un nœud est supérieure à la valeur du seuil minimale ; sinon, $\boldsymbol{NR(i)}$ est mis à ''0''. On aura alors :

$$\boldsymbol{MCNR(i) = \frac{[w1 * NR_{RB}(i) + w2 * NRT_{idle}(i) + w3 * NR_{QL}(i)]}{S_{mob}(i)}} \qquad (29)$$

Selon les schémas conventionnels, la valeur de la métrique MCNR d'un nœud est mesurée et est surveillée périodiquement pour être diffusée via des messages HELLO et TC au support dans la phase de la détection topologique.

IV.5. Calcul du coût des liens basés sur la métrique MCNR

Dans la plupart des travaux de recherche et d'autres documentations, l'algorithme de Multipath Dijkstra illustré a été utilisé pour calculer des multiples chemins vers une destination. Cependant, le coût de liaison initial de chaque liaison, noté C dans l'algorithme, a été calculé en se basant sur la métrique MCNR des deux nœuds pour chaque liaison. Pour ce, le chemin optimal de la source à la destination est le chemin avec le coût minimum de liens et la métrique de rang MCNR d'un nœud la plus élevée.

Une fonction de coût a été utilisée pour estimer le coût de liaison entre les nœuds ***i*** et ***j*** en fonction de leurs rangs ***MCNR(i)*** et ***MCNR(j)*** comme suit :

$$\boldsymbol{MCNR(i,j) = \frac{MCNR(i)}{MCNR(i) + NR_{max}} + \frac{MCNR(j)}{MCNR(i) + NR_{max}}} \qquad (30)$$

$$\boldsymbol{Link_{Cost(i,j)} = 1 + \frac{1}{e^{MCNR(i,j)}}} \quad (31)$$

Où $\boldsymbol{NR_{max}}$ est le rang maximal d'un nœud, ***MCNR(i)*** et ***MCNR(j)*** sont les rangs multicritères instantanés des nœuds ***i*** et ***j***, respectivement et ***MCNR(i, j)*** est le rang du lien entre les deux nœuds ***i*** et ***j***. Normalement, une valeur métrique de rang d'un lien est restreinte dans la plage de [0,1] pour classer l'état des nœuds aux deux extrémités du lien.

Si plusieurs trajets sont disponibles, initialement, les coûts de toutes liaisons sont égaux aux coûts de liaisons obtenues à partir des formules précédentes. Les nœuds de saut suivants sont sélectionnés en fonction de leurs poids, qui sont mis à jour en fonction des coûts de liaison vers eux. Les nœuds avec la valeur la plus élevée de rang de nœuds seront connectés par les liens avec le coût minimum et construiront la meilleure route vers la destination.

IV.6. Exemple d'optimisation d'énergies : Le balancement de charges

On a montré dans les chapitres précédents que la consommation énergétique d'un nœud dans un réseau MANET/WSN dépend de son état. Les chefs de groupe ou nœuds responsables (MPR) et les nœuds de liaison consomment beaucoup plus d'énergies que les nœuds ordinaires car ils sont responsables de la diffusion des paquets. Cette situation peut avoir des conséquences néfastes sur la durée de vie du réseau et sur le taux de livraison de paquets qui baisse avec la rupture de certaines sessions [23].

La rupture d'une session est causée par la mort d'un certain nombre de nœuds où son énergie résiduelle est égale à zéro, généralement des chefs de groupe et des nœuds de liaison, de telle façon qu'on ne peut pas trouver un chemin entre la source et la destination de cette session.

Pour remédier à ce problème, on a proposé une optimisation heuristique, appelée N Interval based Load Balancing Heuristic **(N -ILBH),** qui permet de distribuer le trafic sur un maximum de nœuds du réseau de sorte à avoir un niveau de consommation d'énergies relativement égale pour tous les nœuds du réseau et ainsi augmenter la durée de vie d'un réseau capteurs sans fil et mobile.

IV.6.1. Algorithme de 1-ILBH et N-ILBH

L'optimisation heuristique **N-ILBH** est l'extension de l'heuristique **1-ILBH** qui force un chef de groupe (MPR ou Cluster Head) ou un nœud de liaison, quand son énergie consommée atteint 2*énergie batterie, à changer d'état à un état ordinaire et réduit son temps d'écoute et de réception en configurant sa carte radio. Après ce changement d'état, le chemin traversant ce nœud pourrait

devenir invalide et dans ce cas, un nouveau chemin doit être déterminé en utilisant le protocole de groupage (PC). Après que le nœud ait atteint le deuxième seuil 3*énergie batterie, 1-ILHB réveille le nœud qui peut changer d'état en exécutant le protocole de groupage (PC). Il est évident que 1-ILHB va générer plus de paquets de contrôle car à chaque fois un chef de groupe ou nœud de liaison est forcé de changer son état à un état ordinaire, il y a reconstruction des chemins. Cependant, même avec cette surcharge qui est minimale, 1- ILHB permet d'augmenter la durée de vie du réseau. Le pseudo code de l'heuristique l-ILHB sera illustré à la section suivante où chaque nœud du réseau exécute ce pseudo code d'une façon continue.

Voici l'algorithme de 1-ILHB, qui est illustré de la manière suivante.

Input

Paquet ;

*/*paquet reçu par un nœud*/*

Batterie=500 ;

/ énergie maximale de ta batterie d'un nœud du réseau /*

α et β;

*/*constantes entre O et 1 */*

k = 10 ;

*/*facteur de réduction des temps d'écoute et temps de réception */*

Noeud ;

*/*un enregistrement qui contient deux attributs : (1) niveau_Energie : valeur courante de l'énergie consommée par un nœud ; et (2) état: état courant du nœud */*

temps_écoute_par_defaut ;

temps_réception_par_defaut ;

Variables

Temps_écoute ;

Temps_réception ;

Begin

Nœud.état = initial;

***While** (true)*

```
        if (Nœud reçoit paquet)
          if ((Noeud.niveau_Energie> a*batterie) && (Noeud.niveau_Energie< β *batterie ));
              /* changer l'état et reconfigurer la carte radio */
            Noeud.état= ordinaire ;
            Temps_écoute= temps_écoute_par defaut /k ;
            Temps_réception= temps_réception_par_defaut /k ;
          else
           /*Reconfigurer la carte radio */
            Temps_écoute=temps_écoute_ par_defaut ;
            Temps_réceptïon= temps_réception_par_defaut ;
          exécuter PC;
        Endif
      Endif
    Endwhile
End
```

IV.6.2. Algorithme de N-ILBH

Dans N-ILHB, un nœud fonctionne normalement jusqu'à ce qu'il atteigne un seuil de blocage *αi (i=1 ; … ; N)* où il reste inactif (il est forcé). Le nœud ne pourra plus participer à la construction de chemins jusqu' à ce qu'il arrive au seuil de déblocage *βi (i=1, .., N)*. Dans ce cas de *N=4*, un nœud passe par quatre blocages successifs, donc des ruptures de chemins, ce qui explique le niveau élevé de paquets RREQ. On peut dire que le paramètre N doit être grand pour des nœuds qui fonctionnent sur une période de temps élevée.

Voici l'algorithme de N-ILHB qui est l'amélioration de 1-ILHB.

```
Input
    Paquet ; /*paquet reçu par un nœud*/
    Batterie =500 ; /*énergie maximale de la batterie d'un nœud réseau */
    (α1, β1, α2, β2, α3, β3, α4, β4); /* constantes entre O et 1 */
     k =10 ; /*facteur de réduction des temps d'écoute et temps de réception* /
```

N = 4 ; / Nombre de balancement */*

*Nœud ; /*un enregistrement qui contient deux attributs : (1) niveau_Energie: valeur courante de l'énergie consommée par le nœud ; et (2) état : état courant du nœud*/*

temps_écoute_par_défaut ;

temps_réception_par_défaut ;

Variables

Temps_écoute ;

Temps_réception ;

Begin

Introduire (N) ;

*Introduire (α1, α2, α3, α4) ; /*seuil de blocage*/*

*Introduire (β1, β2, β3, β4) ; /*seuil de déblocage*/*

Noeud. état= Initial;

***While** (true)*

***If** (Noeud reçoit paquet)*

***If** (N=1)*

***If** ((Noeud.niveau_Energie> α1*batterie) && (Noeud.niveau_Energie<β1*batterie))*

/ Reconfigurer la carte radio et changer état */*

Noeud.état= ordinaire ;

Temps_écoute=temps_écoute_par_defaut /k ;

Temps_réception=temps_réception_par_défaut /k ;

Else

/ reconfigurer la carte radio */*

Temps_écoute=temps_écoute_par_defaut ;

Temps_réception=temps_réception_par_defaut ;

Execute PC;

Endif

Else

If *(N=2)*

If *((Noeud.niveau_Energie> α1 *batterie) &&(Noeud.niveau_Energie<β1*batterie))*

*OR ((Noeud.niveau_Energie > α2 *batterie) && (Noeud.niveau_Energie<β2 *batterie))*

/ Reconfigurer la carte radio */*

Nœud.état=ordinaire ;

Temps_écoute=temps_écoute_par_defaut /k ;

Temps_réception=temps_réception_par_defaut /k ;

Else

/ reconfigurer la carte radio */*

Temps_écoute=temps_écoute_par_defaut ;

Temps_réception=temps_réception_par_defaut ;

Execute PC;

Endif

Else

If *(N=3)*

If *((Noeud.niveau_Energie> αl *batterie) && (Noeud.niveau_Energie<β1 *batterie)) OR*

*((Noeud.niveau_Energie> a2 *batterie) && (Noeud.niveau_Energie<β2 *batterie)) OR*

*((Noeud.niveau_Energie> a3 *batterie) && (Noeud.niveau_Energie<β3 *batterie))*

/ Reconfigurer la carte radio */*

Nœud.état = ordinaire ;

Temps_écoute=temps_écoute_par_defaut / k ;

Temps_réception=temps_réception_par_defaut / k ;

Else

/ reconfigurer la carte radio*/*

Temps_ écoute=temps_écoute_par_defaut ;

Temps_réception=temps_réception_par_defaut ;

Execute PC;

```
        Endif
      Else
        If (N=4)
      If ((Noeud.niveau_Energie> α1 *batterie) && (Noeud.niveau_Energie<β1*batterie)) OR
        ((Noeud.niveau_Energie> a2 *batterie) && (Noeud.niveau_Energie<β2 *batterie)) OR
        ((Noeud.niveau_Energie> α3 *batterie) && (Noeud.niveau_Energie<β3 *batterie)) OR
        ((Noeud.niveau_Energie> α4 *batterie) && (Noeud.niveau_Energie<β4*batterie))
        /* Reconfigurer la carte radio*/
        Nœud.état = ordinaire ;
        Temps_écoute = temps_écoute_par_defaut / k ;
        Temps_réception = temps_réception_par_defaut / k ;
      Else
            /* reconfigurer la carte radio */
            Temps_écoute=temps_écoute_par_defaut
            Temps_réception=temps_réception_par_defaut ;
            Execute PC;
          Endif
        Endif
      Endif
    Endif
  Endif
Endwhile
End
```

CHAP V. REVUE DE SOLUTIONS D'OPTIMISATION D'ENERGIES DANS UN RESEAU MANET ET WSN AVEC OLSR

V.0. Introduction

Beaucoup de solutions d'optimisations d'énergies avec le protocole OLSR ont été faites par de nombreux chercheurs scientifiques là où certains ont essayé de modifier le format des messages de contrôles Hello et TC pour permettre l'échanges soit des niveaux d'énergies et ou des batteries résiduelles entre tous les nœuds du réseau MANET ou WSN dans le but de choisir une meilleure route de données et d'assurer un choix des nœuds MPR optimal connaissant qu'un nœud pour être choisi entant qu'un nœud MPR doit avoir un niveau d'énergie ou de batteries lui permettant de réaliser ses tâches importantes. D'autres ont utilisé des différentes métriques et méthodes relatives à l'optimisation d'énergies des nœuds capteurs.

V.1. Solutions avec les mécanismes à chemin unique

Ces types de solutions sont plus applicatives dans des réseaux moins denses et à chemin unique où on mobilise un seul chemin entre deux paires de nœuds c'est-à-dire entre émetteur et récepteur. Parmi celles, il y a ceux qui mobilisent le choix des nœuds MPR en se basant sur l'énergie de nœuds échangée à partir des informations intégrées dans des champs modifiés des messages de contrôles, on va les voir en détail dans les sections suivantes.

D'autres solutions envisagent d'abord de calculer à chaque nœud du réseau, la valeur de sa volonté *(Willingness)* trouvée à partir de son niveau d'énergie. Cette valeur de la volonté d'un nœud sera très utile pendant le choix des nœuds MPR. Parmi ces solutions, il y a ceux qui prennent en compte la mobilité d'un nœud car un nœud avec une forte mobilité cause le changement fréquent de la topologie du réseau. Ce qui engendre une consommation énorme d'énergie par les nœuds capteurs pendant le temps de synchronisation, provoquant ainsi la diminution de la performance du réseau MANET et WSN.

Dans cette section, la plupart des solutions proposées pour optimiser l'énergie dans les réseaux MANET et WSN, mobilisent le choix de nœuds MPR lors de l'envoie des données de la source à la destination en calculant la valeur de la volonté des nœuds *(Willingness)* à partir d'énergies des nœuds du réseau dont sa valeur est trouvée soit en faisant une comparaison entre la valeur du seuil d'énergies (*energy_threshold*) donnée et le niveau d'énergies résiduelles de chaque nœud du réseau ou en faisant aussi une comparaison entre la durée de vie *(Lifetime)* du réseau, la valeur du seuil

d'énergie (*energy_threshold*) , la mobilité *(mobility_speed)* et la valeur du seuil de la mobilité *(mobility_threshold)* des nœuds comme on va les voir par la suite.

V.1.1. Solution ou mécanisme avec la méthode M-OLSR

Cette solution « ***M-OLSR : Modified OLSR*** » a été proposée par ***A. K. Jaiswal*** *et* ***S. Tiwari*** [30] pour améliorer la sélection optimale de l'itinéraire avec la sélection des nœuds MPR dynamique dans le réseau mobile ad hoc.

Cette technique dépend de la capacité énergétique des nœuds intermédiaires, si elle atteint le seuil énergétique donné par l'utilisateur, alors un nœud choisira un autre chemin. L'évaluation des performances de cette approche est effectuée à l'aide de différents paramètres à savoir le "délai de bout en bout", le "routage aérien" et "l'énergie résiduelle". Les résultats de simulation obtenus à partir de cette solution montrent que l'algorithme M-OLSR proposé offre une réduction significative de la charge de messages dans le réseau, de la consommation d'énergies et qu'il présente également une petite réduction du débit moyen.

V.1.2. Solution ou mécanisme avec la méthode EI-OLSR

Cette solution **EI-OLSR** (***Energy Efficiency in MANET by improving OLSR protocol*)** est une variante d'efficacités énergétiques dans un réseau MANET basé sur le protocole de routage OLSR et ajoute un nouveau paramètre d'équité énergétique à la technique de relais multipoint (MPR) pour améliorer l'optimisation d'énergies suivant le principe du protocole OLSR [45].

Ce nouveau paramètre est utilisé par cette approche et permet une consommation d'énergies équitable dans un même ensemble de MPR. Dans ce mécanisme, les nœuds à faible puissance sont empêchés dans le processus de routage afin de maintenir des valeurs de puissance similaires pour tous les nœuds mobiles.

Les résultats de la simulation ont montré que cet approche EI-OLSR proposée permet une économie significative d'énergies jusqu'à 14 % et une augmentation de la durée de vie moyenne d'un nœud mobile pouvant atteindre 22 %.

V.1.3. Solution ou mécanisme avec la méthode EEPR-OLSR

Cette solution ***EEPR-OLSR*** *pour An Energy Efficient and Path Reliability OLSR* était proposée par ***A. Sahnoun et al [31] c***omme protocole d'efficacités énergétiques et de fiabilité des chemins pour le routage dans un réseau mobile ad hoc MANET.

Cette approche tente d'améliorer la durée de vie du réseau MANET en maintenant la disponibilité des chemins de routage et en minimisant la consommation d'énergie avec le protocole OLSR amélioré. Elle présente des résultats significatifs par rapport à l'OLSR standard.

L'auteur a utilisé les coordonnées GPS pour récupérer des informations sur les nœuds afin de calculer le chemin le plus stable trouvé à partir de la valeur de Link Expiration Time (LET) donnée par cette formule :

$$\boldsymbol{LET(i,j) = \frac{-(ab+cd)+\sqrt{(a^2+c^2)r^2-(ad-bc)^2}}{a^2+c^2}} \quad (\mathbf{31})$$

Où

$$\boldsymbol{a = v_i \cos(\theta_i) - v_j \cos(\theta_j)\ ;\ b = x_i - x_j\ ;} \quad (\mathbf{31.1})$$

$$\boldsymbol{c = v_i \sin(\theta_i) - v_j \sin(\theta_j)\ \ ;\ \ d = y_i - y_j\ ;} \quad (\mathbf{31.2})$$

Pour cette version **EEPR_OLSR**, la simulation sur NS3 a donné un PDR et des résultats de durée de vie du réseau élevés par rapport à la norme OLSR standard.

V.1.4. Solution ou mécanisme avec la méthode OPE-OLSR

Dans cette solution ***OPE-OLSR*** *pour Optimizing Performance and Energy OLSR*, les auteurs ***S. Prajapati et al*** [32] ont proposé une nouvelle approche de routage dans le protocole OLSR basée sur la consommation d'énergie pour sélectionner les nœuds MPR afin d'augmenter la durée de vie du réseau MANET. L'idée principale est de privilégier les nœuds de N1 ayant une énergie plus élevée à être un MPR car un nœud MPR consomme plus d'énergie que les autres nœuds non-MPR. Si plusieurs nœuds ont la même valeur d'énergie, on choisit le nœud MPR qui couvre le plus de nœuds dans N2.

L'algorithme proposé à cette solution est le suivant :

Let assume X is a node which want to compute MPR set. N1 is a set of X's 1-hop neighborhood and N2 is a set of X's 2-hop neighborhood.

If *(Set N1 is empty)*
{
Wait until topology changes Go to step 1
}
Else
{
if *(Are there two or more nodes offering the same maximum energy)*

{

Select node i in N1 which covers maximum nodes (highest degree) in N2 }

***else** {Select node i which has highest Energy}*

}

Nodes in N2 has symmetric link with node i of N1

Choose node i in N1 as MPR

Delete the nodes of N2 which are symmetrically connected with node i in N1

***If** (Set N2 is empty)*

{ MPR Set of X}

else

{

Consider node i in N1 which has Max Energy and not yet considered as MPR

Remaining nodes in N2 has symmetric link with node i of N1 Go to step 4.

}

Les résultats obtenus après la simulation de cette approche ont montré une grande performance considérable avec moins de consommations énergétiques et un taux de livraison de paquets PDR très élevé par rapport à OLSR standard.

V.1.5. Solution ou mécanisme avec la méthode EOLSR

D'après [33], pour garantir une longue durée de vie d'un réseau MANET, la version OLSR est renforcée par l'ajout de métriques énergétiques et produisant la version EOLSR ***(OLSR for energy consumption)***, ce qui a permis de minimiser la consommation d'énergies et d'optimiser le calcul du chemin de transfert de données en modifiant les formats de message HELLO et TC avec un ajout de deux types de paramètres à savoir l'énergie résiduelle RE et l'énergie consommée CE, ainsi deux versions pour EOLSR ont été établies à savoir EOLSR-RE et EOLSR-EC.

Cette approche proposée par ***Mohit** et **S. Pal*** [33]**,** consiste à fixer les valeurs de seuils pour RE et EC et à vérifier le test suivant : Si l'énergie résiduelle du nœud est inférieure à la valeur fixée du seuil, le nœud est réglé sur LOW-MPR-WILL, sinon il est réglé à HIGH-MPR-WILL. Et si l'énergie consommée par le nœud est inférieure à la valeur fixée du seuil, le nœud prend la valeur HIGH-MPR-WILL sinon il prend la valeur LOW-MPR-WILL.

A partir du résultat de simulation de cette approche, l'auteur a remarqué que l'OLSR-RE est le meilleur protocole en termes d'efficacité énergétique par rapport à EOLSR-EC et OLSR classique.

V.1.6. Solution ou mécanisme avec la méthode EEM-OLSR

Le fonctionnement de ce mécanisme ***EEM-OLSR*** *pour Energy Efficient Mechanism to Enhance MPR Selection in OLSR* proposé par ***Safaa Laqtib*** est similaire avec *LE-OLSR pour Lifetime Enhancement OLSR* proposé par ***Belkheir Mohammed et al.*** [34]

Ces deux mécanismes tous se basent sur l'augmentation de la durée de vie du réseau *(Lifetime)* en assurant un équilibrage des charges dans le réseau MANET. Cela prend en compte les contraintes énergétiques d'un nœud lors de la sélection des routeurs ***(nœuds MPR)***, chargés d'acheminer les paquets de données sur l'ensemble du réseau. Ils utilisent les champs "réservés" disponibles dans les formats des messages HELLO et TC lors de l'échange du niveau d'énergies résiduelles entre les nœuds du réseau. Ce niveau d'énergie résiduelle détermine la valeur du champ "volonté" *(Willingness)* en se basant sur la valeur du seuil d'énergies donnée (***energy_threshold***) et on en déduit la valeur de volonté qui peut être *OLSR_WILL_NEVER, OLSR_WILL_LOW, OLSR_WILL_DEFAULT et OLSR_WILL_HIGH*.

Voici l'algorithme montrant la découverte de volonté (*Willingness)* d'un nœud.

```
dynamic_threshold = 10.0
Energy_level = (energy/init_energy)*100;
   if (energy_level <= dynamic_threshold)
         willingness() = OLSR_WILL_NEVER;          //0
    else if (energy_level <= 30.0)
         willingness() = OLSR_WILL_LOW;            //1
    else if (energy-level <= 60.0)
         willingness() = OLSR_WILL_DEFAULT;        //6
    else willingness() = OLSR_WILL_HIGH;           //7
end
```

Alors l'algorithme permettant le choix des nœuds MPRs suivant leur niveau d'énergie, leurs accessibilités (positions) et leurs dégrées est le suivant :

1) ***N1-hop****: is the set of direct neighbors of x.*
2) ***N2-hop****: is the set of neighbors of the second level.*
3) ***R(y):*** *reachability of each node*
4) ***D(y):*** *degree of each node*
5) ***MPRset:*** *is the set of multi-point relays of x.*
   - *Start with an empty multipoint relay set MPR= {}.*
   - *Calculate the degree D(y) of each node in $N1\text{-}hop$.*
   - *Add to the MPR set the nodes of $N1\text{-}hop$,which are the only nodes to provide reachability to a node in $N2\text{-}hop$.*

     Then remove nodes from $N2\text{-}hop$ the nodes that are covered by nodes in the MPRset.
   - *While ($N2\text{-}hop$ is not empty) Do*

     a. Calculate reachability R(y) of each node in $N1\text{-}hop$

     b. Select as a MPR the node with highest Willingness and non-zero reachability R(y), R(y) > 0
   - *In case of multiple choice select the node, which provides reachability R(y) to the maximum number of nodes in $N2\text{-}hop$.*
   - *In case of multiple nodes providing the same amount of reachability, select the node as MPR whose D(y) is greater.*
   - *Remove all nodes from $N2\text{-}hop$ which are covered by a node in the MPR set.*

Les protocoles EEM-OLSR et LE-OLSR surpassent l'OLSR classique en améliorant considérablement la durée de vie du réseau MANET ou WSN et une diminution efficace de la consommation énergétique. D'où ils sont des solutions adéquates d'optimisation d'énergie dans les réseaux ad hoc en peu denses [35, 36].

V.1.7. Solution ou mécanisme avec la méthode EE-OLSR

Cette méthode OLSR économe en énergie dénommée ***EE-OLSR*** pour *Energy Efficient OLSR for MANET* proposé par ***Floriano De Rango et al.*** [37] se base sur les principes du protocole OLSR standard et tient son performance dans l'économie d'énergie lors de la sélection des nœud MPR en prenant en compte la capacité de la batterie et la durée de vie prédite (***Lifetime)***, basée sur le taux d'épuisement d'énergie d'un nœud pour associer la valeur de la volonté (Willingness) à un nœud comme illustre le tableau suivant :

Tableau 2. Sélection de la volonté basée sur l'énergie.

		La durée de vie prédite (Lifetime)		
		Short	Medium	Long
Batterie	Low	*W_Low*	*W_Low*	*W_Low*
	Medium	*W_Low*	*W_Default*	*W_Default*
	High	*W_Default*	*W_High*	*W_High*
		La volonté d'un nœud (Willingness)		

Voici alors l'algorithme d'attribution de la volonté (Willingness) à un nœud connu sous la dénomination de : ***Energy Aware Willingness*** est illustré dans un pseudo code suivante :

```
double battery = ENERGY/INIT_ENERGY;
double lifetime = 65535;
  if (drain_rate()!=0.0)
      lifetime = ENERGY/drain_rate();
      Willingness () = OLSR_WILL_DEFAULT;
 if (lifetime < 10.0)
      Willingness () = OLSR_WILL_LOW;
       else {
      if (battery < 0.1 && lifetime < 100.0)
          Willingness () = OLSR_WILL_LOW;
       else if (battery > 0.1 && lifetime > 100.0)
           Willingness () = OLSR_WILL_HIGH;
}
```

En plus de la sélection des nœuds MPR, cette solution optimise aussi l'énergie dans des réseaux MANET en considérant les métriques de routage tenant compte d'énergie telles que MTPR : ***Minimum Total Transmission Power Routing,*** MBCR **:** ***Minimum Battery Cost Routing***,

CMMBCR : ***Conditional Min-Max Battery Cost Routing*** et MDR : ***Minimum Drain Rate*** pour choisir le chemin à emprunter les données de la source à la destination.

Ils ont conclu que, en termes de débit, de durée de vie moyenne des nœuds, de temps d'expiration de connexion et de durée de vie des nœuds, le MDR basé sur EE-OLSR surpasse OLSR tout en maintenant la surcharge de contrôle normalisée.

V.1.8. Solution ou mécanisme avec la méthode EM-OLSR

Dans cette solution *EM-OLSR pour Energy efficient and Mobility OLSR in MANET* proposée par ***Najib El Kamoun***, la sélection des nœuds MPR par le protocole OLSR prend en compte la valeur du paramètre Volonté (*Willingness*) calculée à partir de deux métriques dont l'énergie et la mobilité du nœud [38, 39].

Chaque nœud calcule son énergie résiduelle et sa mobilité (vitesse de déplacement) à base des valeurs de seuil de ces deux paramètres *(energy_threshold et mobility_threshold).* On suppose que chaque nœud soit équipé d'un GPS pour déterminer ses coordonnées et on en déduit la valeur de la Volonté (***Willingness***) qui peut être *willigness_default, willigness_low ou willigness_high* selon le résultat de l'algorithme suivant :

if (*lifetime* *> energy_threshold* ***&&*** *mobility_speed > mobility_threshold* ***||*** *energy < energy_threshold* ***&&*** *mobility_speed < mobility_threshold* ***)***

willingness = *willigness_default;* ***// 6***

if *(energy < energy_threshold* ***&&*** *mobility_speed > mobility_threshold****)***

willingness = *willigness_low* ***;*** ***// 1***

if (*energy > energy_threshold* ***&&*** *mobility_speed < mobility_threshold****)***

willingness *= willigness_high****;*** ***// 7***

end.

Alors l'algorithme de sélection des nœuds MPR est illustré comme suit :

1) Sélectionnez les nœuds, avec ***N_willingness=WILL_ALWAYS***, de *N*1 en tant que membres d'un ensemble MPR, puis supprimez les nœuds voisins à deux sauts qui sont couverts par les nœuds sélectionnés de ***N2*** ;

2) Pour chaque nœud ***y*** dans ***N1***, calculez le degré ***D(y)***, qui est défini comme le nombre de voisins symétriques à un saut ;
3) Ajoutez les nœuds de ***N1***, qui sont les seuls nœuds à fournir l'accessibilité à un nœud voisin à deux sauts dans ***N2*** à l'ensemble des MPR. Ensuite, supprimez les nœuds voisins à deux sauts qui sont couverts par les nœuds sélectionnés dans l'ensemble MPR de ***N1*** ;
4) Sauf si ***N2*** est vide, les étapes (1) et (2) seront répétées.
    - ✓ Pour chaque nœud ***y*** dans ***N1***, calculez l'accessibilité ***R(y)***, où l'accessibilité désigne le nombre de nœuds dans ***N2*** qui ne sont pas encore couverts par au moins un nœud MPR dans l'ensemble des MPR, et qui sont accessibles via le nœud ***y*** ;
    - ✓ Sélectionnez le nœud ***y*** avec la volonté *(Willingness)* la plus élevée parmi les nœuds avec une accessibilité non nulle dans ***N1***. En cas de choix multiples, sélectionnez un nœud avec l'accessibilité ***R(y)*** la plus élevée. S'il existe plusieurs nœuds avec la plus grande accessibilité, sélectionnez-en un avec le plus grand degré ***D(y)*** parmi ces nœuds. Ajoutez ensuite le nœud sélectionné à l'ensemble MPR et supprimez les nœuds voisins à deux sauts qui sont couverts par le nœud sélectionné de ***N2***.
5) Pour l'optimisation, les nœuds MPR peuvent être supprimés de l'ensemble MPR si les nœuds MPR restants dans l'ensemble MPR couvrent toujours tous les nœuds voisins à deux sauts.

Le résultat de la simulation effectuée avec le simulateur **NS2** montre que la version EM-OLSR donne de meilleurs résultats par rapport au protocole OLSR standard en termes de débit, de paquets de données perdus et de consommation d'énergies.

De toute évidence, EM-OLSR est plus performant, le pourcentage du taux de perte de données a diminué par rapport à OLSR et E-OLSR, les nœuds sont désormais capables de détecter leurs énergies et leurs mobilités, et de décider de leur stabilité en ce qui concerne leur valeur de vitesse de la mobilité.

V.2. Solutions avec mécanismes de choix des MPR sécurisés

V.2.1. Solution avec la méthode ES-OLSR

Dans OLSR, les relais multipoints MPR sont sélectionnés par les nœuds pour relayer leur trafic de données/contrôle à travers le réseau. Les schémas de sélection des MPR existants sont basés sur des métriques d'énergies et de QoS telles que l'énergie résiduelle, la stabilité de la liaison, la durée de vie du réseau, la bande passante, etc. Cependant, ces schémas ne prennent en compte aucune métrique de sécurité et peuvent donc ne pas fonctionner dans un environnement hostile, ce qui

prouve que certains nœuds MPR ayant un mauvais comportement ont tendance à conserver leur énergie en supprimant les paquets des autres nœuds voisins au lieu de les transmettre [44].

Cette solution *ES-OLSR pour Energy efficient and Secure OLSR* proposée par **Anjali Anand et al**. [40] met en place un mécanisme de sélection MPR stables, sécurisée et économe en énergie ES-MPR qui prend en compte diverses métriques énergétiques et le mauvais comportement des nœuds dans le processus de sélection MPR. Il calcule « l'indice d'éligibilité composite ***CEI*** » des nœuds basé sur la probabilité d'un mauvais comportement ***MP***, le facteur de puissance ***PF***, l'indice de stabilité ***SI***, le taux de perte Hello et le comportement de transfert ***FB***, qui doit être combiné avec la valeur de la volonté calculée à l'aide de la durée de vie, de la bande passante disponible et de l'occupation de la file d'attente pour fournir une sélection séparant les paramètres relatifs aux MPR d'inondation et de routage.

Les performances de l'ES-MPR sont évaluées à l'aide de NS-2 en le comparant aux techniques de sélection MPR existantes. ES-MPR surpasse les schémas existants en termes de la durée de vie du réseau, de PDR et d'autres métriques en raison de sa capacité à fournir des MPR sûrs et stables économes en énergie, formant ainsi une topologie durable et fiable dans le réseau.

Contrairement aux schémas existants qui dépendent de la volonté (Willingness) comme paramètre fondamental pour la sélection des nœuds MPR, ES-MPR effectue une sélection des nœuds MPR sécurisée et économe en énergies en fonction du paramètre de sélection SP (Selection Parameter), du degré et de l'accessibilité du nœud. Sur base de la volonté (Villingness) et de l'IEC Indice d'Eligibilité Composite (CEI Composite Eligibility Index), dans ES-MPR des paramètres de sélection SPF(v) et SPR (v) distincts sont déterminés respectivement pour l'inondation et le routage MPR comme suit :

$$SP_F(v) = \phi \times CEI_F(v) + (1 - \emptyset) \times W_F(v) \quad (32)$$

$$SP_R(v) = \phi \times CEI_R(v) + (1 - \emptyset) \times W_R(v) \quad (33)$$

L'algorithme d'ES-MPR est illustré dans un pseudo code suivant :

MPR(u) ← *empty*
N1(u) ← *one-hop neighbours of* ***u***
N2(u) ← *two-hop neighbours of* ***u*** *reachable by* ***N1(u)***
SPth ← *14 // selection parameter thresholds*

SP(v) = SP_F(v) *or* ***SP_R(v)*** *// For Flooding or Routing MPR selection respectively.*

for *every node* ***v∈N1(u)***

if *(**SP(v)>=SPth**) then*

Add node ***v*** *to* ***MPR(u)***

Remove nodes covered by ***v*** *from* ***N2(u)***

end

for *every node* ***x ∈N2(u)***

if *(there is only one* ***v*** *in* ***N1(u)*** *with* ***D(v,x)*** *defined)* ***then***

Add node ***v*** *to* ***MPR(u)***

Remove nodes covered by ***v*** *from* ***N2(u)***

End

while *(**N2(u)** not empty)*

select ***v*** *in* ***N1(u)*** *having non-zero reachability based upon following priority:*

add node ***v*** *to* ***MPR(u)*** *which has*

(a) Highest ***SP(v)***

(b) Highest ***R(v, MPR)***

(c) Highest ***D(v)***

End

V.2.2. Solution ou mécanisme avec la méthode EIMO-ESOLSR

Cette solution ***EIMO-ESOLSR*** *pour Enhanced Intellects-Masses Optimizer ESOLSR* proposée par ***Hamela Kanagasundaram et A. Kathirvel*** fonctionne de la même manière que le modèle ESOLSR qui utilise un mécanisme ES-MPR [40] lors de la sélection des nœuds MPR qui est un mécanisme sécurisé permettant d'éviter le mauvais comportement des nœuds MPR ayant tendance à protéger leur énergie en supprimant différents paquets de nœuds voisins au lieu de les envoyer [43].

Cette approche [41] introduit une méthode optimiseur appelée EIMO dans le mécanisme ES-MPR, ce qui prouve que dans cette approche la découverte d'itinéraire est avancée du fait que certains paramètres comme la bande passante disponible ***(AB)***, l'occupation de la file d'attente ***(QO)*** et la durée de vie du réseau ***(LT)*** sont considérés pour déterminer la valeur de volonté des nœuds ***(Willingness)*** et la probabilité de mauvais comportement ***(MP)***, le facteur de puissance ***(PF)*** et le comportement de transfert ***(FB)*** sont considérés comme métriques d'indice d'éligibilité composite

(CEI). Contrairement à d'autres modèles énergétiques, cette approche est moins énergétique et sécurisée.

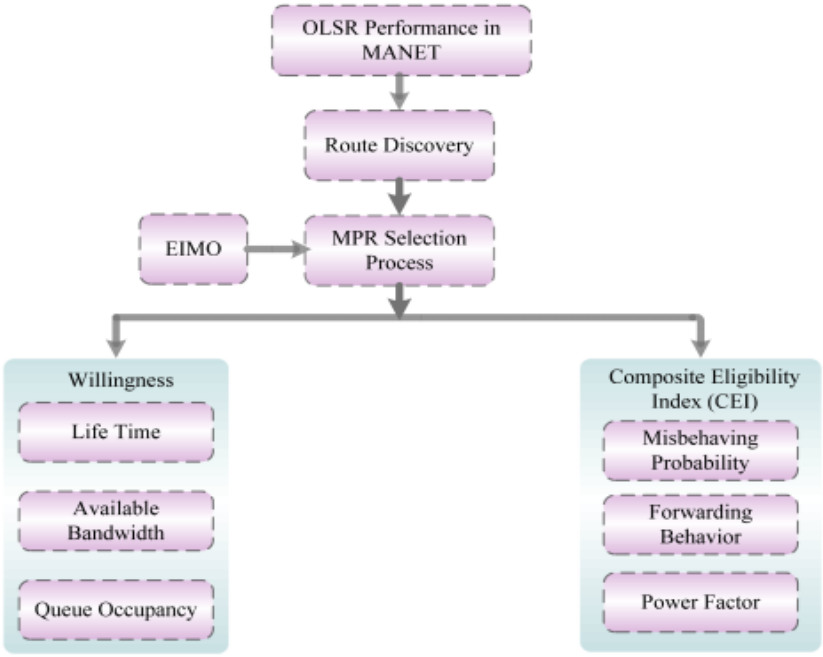


Figure 11. Architecture du modèle EIMO-ESOLSR dans MANET

L'implémentation ou la mise en œuvre de l'optimiseur EIMO doit se faire en 5 étapes suivantes :

1) Initialisation des paramètres de Willingness et de CEI
2) Génération aléatoire des nœuds MPR en se basant sur ses valeurs d'aptitude. Selon la formulation suivante, l'intellect de chaque nœud individuel est mis à jour

$$\boldsymbol{n'_{i,j}} = \begin{cases} \boldsymbol{x_i + y_j(z_j - x_j)\ si\ |n_{i,j} - n_{k,j}| \leq \varepsilon} \\ \boldsymbol{n_{i,j} + \varphi_{i,j}(n_{i,j} - n_{k,j})} \qquad \boldsymbol{si\ no} \end{cases} \tag{34}$$

3) La sélection gloutonne (the greedy selection) est appliquée à l'étape (iii) pour obtenir la solution optimale générant aléatoirement des MPR et elle est donnée comme suit :

$$\boldsymbol{n_i} = \begin{cases} \boldsymbol{n_i\ si\ f(n_i)} & \boldsymbol{< f(n'_i)} \\ \boldsymbol{n'_i} & \boldsymbol{si\ non} \end{cases} \tag{35}$$

4) La mise à jour de la solution de paramètre optimale générée aléatoirement pour chaque nœud MPR en utilisant l'équation suivante :

$$n'_{i,j} = \begin{cases} n_{i,j} + \varphi_{i,j}(n_{i,j} - n_{k,j}) \; si \; z_1 < c_{r,i} \\ n_{i,j} \qquad\qquad\qquad\qquad si \; non \end{cases} \tag{36}$$

5) Après la mise à jour de la solution optimale générée aléatoirement, la fonction de fitness est calculée pour cette solution et elle est mesurée en utilisant la formule suivante de la fonction objective.

$$Fitness = f(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6) \tag{37}$$

Où $f_1 = MaxW_{LT}$, $f_2 = MaxW_{AB}$, $f_3 = MaxW_{QO}$, $f_4 = MinCEI_{MP}$, $f_5 = MaxCEI_{FB}$ et $f_6 = MaxCEI_{TP}$

Ici, W_{LT}, W_{AB}, W_{QO}, CEI_{MP}, CEI_{FB} et CEI_{PF} sont des paramètres utilisés pour trouver les nœuds MPR optimaux à partir du réseau.

Après avoir trouvé la solution optimale, le processus est répété pour déterminer si un autre meilleur nœud est généré à partir de l'ensemble des nœuds de l'OLSR. Le processus est répété jusqu'à ce que les critères de terminaison soient remplis.

Le pseudo code d'EIMO est illustré dans l'algorithme suivant

Entrée *: initialise les paramètres LT, AB, QO, MP, FB et PF pour chaque nœud*
Sortie *: sélection MPR optimale*
Générer aléatoirement les nœuds MPR pour tous les nœuds individuels ni
Sélectionnez le meilleur nœud MPR comme intellect.
Tant que les critères d'arrêt ne sont pas remplis,
Pour chaque nœud n_i faire
S'il s'agit d'un nœud intellectuel ou intelligent
Générer une descendance, n_i', en utilisant (13)
a. *Pince n_i'*
b. *Calculer l'aptitude (fitness) pour chaque nœud n_i'*
c. *Appliquer une sélection gourmande entre n_i et n_i' entre eux*
Sinon si c'est un nœud de masses (non intellects)
a) *Trouver $C_{r,i}$ en utilisant (15)*
b) *Calculer une descendance, n_i', en utilisant (14)*
c) *Pince n_i'*

d) Calculer l'aptitude (fitness) pour chaque nœud $\boldsymbol{n_i'}$

e) Appliquer une sélection gourmande entre $\boldsymbol{n_i}$ *et* $\boldsymbol{n_i'}$ *entre eux*

Fin si

Fin pour

Répétez le processus à partir de l'ensemble du nœud de l'OLSR

Fin tant que

V.3. Solutions avec les mécanismes à chemins multiples

V.3.1. Solution ou mécanisme avec la méthode MBA-OLSR

Ce mécanisme MBA-OLSR *(Multipath Battery Aware OLSR)* proposé par *Waheb A. Jabbar*, *M. Ismail* et *Rosdiadee Nordin* optimise l'énergie dans des réseaux MANET en choisissant une meilleure route menant à la destination parmi plusieurs. Pour le faire, il utilise l'algorithme de Dijikstra en calculant l'énergie résiduelle des batteries (***TLV_Residual_Battery***), le cout des liens (***TLV_Link_Cost***) et leurs mobilités (***TLV_Mobility***) qui sont encapsulées dans un champ TVL des messages Hello et TC échangés entre les nœuds [30].

L'algorithme de Dijkstra pour les chemins multiples avec la méthode MBA-OLSR est le suivant :

```
Calculate N routes in G from s to d
MultiPathDijkstra (s, d, G, N)
 C1 = C
 G1 = G
For i = 1 to N do
      SourceTreei = Dijkstra(Gi, s)
      Pi = GetPath(SourceTreei, d)
     for all arcs e in E
          if e is in Pi or ReVerse(e) is in Pi then
              Ci+1(e) = fp(Ci(e))
              else if the vertex Head(e) is in Pi then
                  Ci+1(e) = fe(Ci(e))
             else
                  Ci+1(e) = Ci(e)
          end if
      end for
     Gi+1 = (V, E, Ci+1)
  end for
return (P1, P2, . . . , PN)
```

Le calcul de la batterie résiduelle et du cout des liens est régi avec les formules suivantes :

$$\boldsymbol{RB_{ij} = \frac{RB_i}{RB_i + MRB} + \frac{RB_j}{RB_j + MRB}} \quad (\mathbf{38})$$

$$\boldsymbol{LinkCost_{ij} = 1 + k * \frac{1}{e^{RB_{ij}}}} \quad (\mathbf{39})$$

Où *MRB* est la capacité maximale de la batterie, *RBi* et *RBj* sont l'énergie résiduelle de la batterie des nœuds *i* et *j*, respectivement, et *RBij* est le rapport d'énergie résiduelle de la batterie des deux nœuds *i* et *j*.

Ce mécanisme a montré une supériorité avec une réduction significative de la consommation d'énergies que les mécanismes ***MP-OLSR*** et ***MPQ-OLSR*** à cause de : taux de livraison de paquets plus élevé ; délai de bout en bout est inférieur et la durée de vie du réseau est prolongée.

V.3.2. Solution ou mécanisme avec la méthode MBQA-OLSR

Cette solution MBQA-OLSR *(Multipath Battery and Queue Aware OLSR)* est proposée par ***Waheb Abdul Jabbar et al.*** [29] pour optimiser l'énergie dans des Réseaux sans fil ad hoc mobile multi-sauts, et est basée principalement sur les mécanismes suivants :

1) **Mécanisme EA-MPR** (***Energy Aware for MPR Selection***).

Ce mécanisme est utilisé lors de la sélection des nœuds MPR là où l'ensemble de nœuds MPR est sélectionné en se basant sur trois concepts principaux qui sont la volonté du nœud *W(n) Willingness* qui est représenté par une valeur numérique allant *de WILL_NEVER ''0'' à WILL_ALWAYS ''15'',* trouvée à partir d'un processus de comparaison entre la durée de vie du réseau et la durée d'inactivité d'un nœud ; le degré d'un nœud *D(n)* et l'accessibilité d'un nœud *R(n)* comme expliqué dans l'algorithme standard pour la sélection d'ensembles MPR.

Par conséquent, dans cette approche, on a proposé un nouveau paramètre de volonté (*Willingness*) pour le mécanisme de sélection MPR, connu sous le nom de EA-MPR qui sera décrit dans l'algorithme suivant :

Require: higher lifetime && lower Idle time
Let MTidle = 100.0 // The maximum idle time duration.
Let MAX_LT = 65535.0 // The maximum node's lifetime
Let MAX_LTth = 200.0 // maximum lifetime threshold

```
Let MIN_LTth = 20.0 // minimum lifetime threshold
Let W(n) = Willingness of node n
for each node n do
    Get LT(n), Tidle(n)
        if LT(n) >= MAX_LTth && Tidle(n) >= 0.8×MTidle then
            W(n) = WILL_ALWAYS      // 15
        else if (MAX_LTth >LT(n) >= 100) && (0.8×MTidle >Tidle(n) >=0.5×MTidle) then
            W(n) = WILL_HIGH      // 14
        else if (50 > LT(n) >= MIN_LTth) || (0.5×MTidle >Tidle(n) >= 0.2×MTidle) then
            W(n) = WILL_LOW      // 1
        else if LT(n) < MIN_LTth || Tidle(n) < 0.2×MTidle then
            W(n) = WILL_NEVER    // 0
        else
            W(n) = WILL_DEFAULT
        end if
end for
return (W(n))
```

Ainsi, l'approche de la sélection des nœuds MPR proposée est basée sur trois modèles principaux : Modèle de durée de vie du réseau (*Lifetime*) prenant en compte le taux de consommation énergétique (the drain rate), Modèle énergétique des nœuds et Modèle de la batterie prenant en compte l'énergie de la batterie (*battery energy***)**.

L'algorithme de la sélection des nœuds MPR avec le mécanisme EA-MPR est le suivant :

```
MPR(s)← { } Empty
N(s)←one-hop neighbors from node 's'
N'(s) ←two-hop neighbors reachable by N (s) nodes
for each node x in N(s) do
    if W(x) = WILL_ALWAYS then
        Add node x to MPR(s)
        Remove nodes in N2(s) that are covered by these N(s) nodes
    end if
```

end for

for ***each node*** *y* ***in*** *N2(s) do*

if ***there is only one node*** *x* ***in*** *N(s)* ***with*** *D (x, y)* ***is defined*** *then*

Add node *x* ***to MPR****(s)*

Remove nodes in *N2(s)* ***that are covered by*** *x*

end if

end for

while N2(s) ***is not empty,*** *do*

Select node *x* ***in*** *N(s)* ***with non-zero*** *reachability* ***based on the following priority order*** *then*

Add node *x* ***to MPR****(s) which has****:***

(a) highest *W(x)*

(b) highest *R(x, M)*

(c) highest *D(x)*

end while

For optimization, node *M* ***in the selected MPR****(s)* ***set can be removed only if the other nodes in the MPR****(s)* ***set still cover all nodes in*** *N2(s).*

2) Métrique de rang de nœuds multicritères (***MCNR Multi-criteria node rank metric***).

Cette métrique MCNR est proposée en se basant sur les trois métriques de nœuds à savoir : la batterie résiduelle (*residual battery*), la durée d'inactivité (*idle time duration*) et la longueur de la file d'attente (*queue length*). Ces métriques doivent inclure dans les formats des messages Hello et TC plus précisément en ajoutant la valeur de *TLV-Node-Rank* dans un champs appelé TLV **:** Type-Length-Value.

Dans ce cas, la métrique MCNR pour chaque nœud indique alors l'état du nœud en termes de ressources énergétiques disponibles, d'activités et de congestions.

3) Calcul du coût des liens basés sur la métrique MCNR.

Ce mécanisme calcule le cout des liens des nœuds en se basant sur la métrique MCNR et l'algorithme de Dijkstra dans le but de trouver la meilleure route menant vers la destination. Dans ce cas les nœuds avec la valeur la plus élevée de rang de nœud seront connectés par les liens avec le coût minimum et construiront la meilleure route vers la destination.

L'Algorithme de calcul d'itinéraire pour MBQA-OLSR est décrit comme suit :

s = source node, d = destination node
for all entries do // source-destination pairs
Start MBQA-OLSR and set its parameters
Set number of paths = N
Empty the multipath routing table
Get node rank = MCNR(i) // Calculated from Formula(28)
Exchange HELLO and TC messages, including MCNR(i) value with neighbors
Gather all the topology information, including nodes (address, type, weight, and MCNR(i))
Construct the network graph (the nodes map and the arcs map)
Add the node 'i' to the node map

if d in the Link Set then
Add the entry to the multipath routing table
else if d in the Neighbor Set then
Add the entry to the multipath routing table
else
The node d will be in the Topology Set
end if
Add the node d to the nodes map
Add the arcs in both directions to the arcs map
for k = 0 to k = N-1 do // all paths
Start the Multipath Dijkstra Algorithm // To compute the multiple paths
Set the weight of node 's' to 0 and for others node to MAX-WEIGHT
for all nodes in node map do
Get the link_cost (s,i) to the next hop nodes using Formula (30) based on MCNR(s, i)
Renew the weights of nodes based on link_cost(i, j)
Select the next hop node i with minimum weight // maximum MCNR(i)
if the address of i = the address of d then
Construct the routing entry
Add the entry to the multipath routing table
else

There is no route found
end if
Renew the cost of the arcs using Fp and Fe functions
end for
end for

Après simulation à l'aide d'un simulateur **Exata Network Simulator,** les résultats montrent l'impact de la taille du réseau et de la taille des paquets sur les métriques de performance du protocole MBQA-OLSR par rapport aux protocoles MP-OLSR et MPQ-OLSR, ce qui prouve que MBQA-OLSR est meilleur dans l'optimisation de la consommation d'énergie par rapport à ces autres protocoles.

V.3.3. Solution ou mécanisme avec la méthode MBMA-OLSR

Multipath Battery and Mobility Aware OLSR routing scheme **(MBMA-OLSR)** est une solution proposée par **Waheb A. Jabbar et al.** [45]**,** et s'appuie sur le mécanisme EMA-MPR lors de la sélection des nœuds MPR là où les nœuds ayant un niveau d'énergie plus élevé et une vitesse inférieure sont plus prioritaire à être sélectionnée en tant que des MPR. En effet, le MBMA-OLSR est capable de gérer les nœuds à haute mobilité et de sélectionner les meilleurs chemins multiples vers les destinations [43].

Dans *EMA-MPR*, la métrique MCNR d'un nœud est principalement basée sur deux paramètres : *la batterie résiduelle (RB)* et *la vitesse de mobilité (Smob).*

L'algorithme d'EMA-MPR est le suivant :

***Require**: Lifetime > MIN_LTth && Node Rank > NRmin*
***Ensure** Higher Residual Battery && Lower Speed of nodes*
W(i) ← willingness of node i
for** each node i **do
Get LT(i), NRmc(i), Smob(i) % From Eq. (28 & 29) et Eq. (21)
while** ((LT(i) > MIN_LTth) **&&** (NRmc(i)≥NRmin)) **do
if (**NRmc(i) ≤ 0.3*NRmax) || (Smob(i) > 0.7*Smax) **then
W(i) = WILL_LOW
else if (**NRmc(i) ≥ 0.7*NRmax) **&& (**Smob(i) ≤ 0.3* Smax) **then
W(i) = WILL_HIGH // 14

```
        else
            W(i) = WILL_DEFAULT      //7
        end if
            return W(i)
    end while
            W(i) = WILL_NEVER
end for
return W(i)
```

Donc le MBMA-OLSR est basé sur les valeurs des métriques considérées *(MCNR, RB, LT et Smob)* d'un nœud. L'algorithme de la sélection des nœuds MPR est similaire à celui du mécanisme MBQA-OLSR sauf que la différence réside au niveau des paramètres prises en considération lors de choix de la volonté *(Willingness)* sur chaque nœud du réseau MANET.

V.3.4. Solution ou mécanisme avec la méthode MEQSA-OLSRv2

Ce Protocole de routage d'état de lien optimisé compatible avec l'énergie multi-chemin et la qualité de service *(QoS)* version 2 proposé par **Waheb A. Jabbar et al.** [28], était développé pour faire face aux défis posés par les ressources énergétiques limitées, la mobilité des nœuds et la congestion du trafic lors de la transmission de données dans les réseaux MANET-WSN**.**

Ce protocole utilise un rang de nœud selon une métrique multicritère de rang de nœud (MCNR) prenant en compte divers critères qui sont la *durée de vie d'un nœud (**node's lifetime**), l'énergie résiduelle de la batterie (**residual battery energy**), le temps d'inactivité d'un nœud (**node's idle time**), la mobilité (vitesse) d'un nœud (**node's speed**) et la longueur de la file d'attente (**queue length**).*

Dans MEQSA-OLSR, la métrique MCNR est utilisée par une nouvelle fonction d'évaluation de la qualité de la liaison lors du calcul de plusieurs routes. Il est également adopté pour sélectionner un ensemble de nœuds MPR en utilisant un mécanisme de sélection des MPR sensibles à l'énergie et à la qualité de service pour inonder les informations topologiques.

L'algorithme d'estimation du rang d'un nœud ***(****MCNR Estimation in MEQSA-OLSRv2)* est le suivant :

RB()← residual battery of node i

Tidle(i)← idle time duration of node i

QL(i)← length of queue at node i

Smob(i) ←Speed of node i

LT(i) ← lifetime of node i, i∋ V

NRi ←NRmc of node i

***Get** LT(i), RB(i), Smob(i), Tidle(i), QL(i) of node i*

if** (LT(i) ≤ MIN_LTth) **then

NRi = 0

else if** (Smax == 0) **then

NRi = NRmc(i) // équation $\boldsymbol{NR_{mc}(i) = w1 * NR_{RB}(i) + w2 * NRT_{idle}(i) + w3 * NR_{QL}(i)}$

else

NRi = NRmc(i)

// équation $\boldsymbol{NR_{mc}(i) = \left[w1 * NR_{RB}(i) + w2 * NRT_{idle}(i) + w3 * NR_{QL}(i)\right]/S_{mob}(i)}$

end if

Return NRi

Ainsi, l'algorithme du mécanisme EQSA-MPR Willingness Setting est le suivant :

***Require**: Node Rank > NRmin*
***Ensure** Acceptable node lifetime && Higher Residual Battery && Lower Speed && Lower traffic && Lower idle time of nodes*
NRmax ← the maximum node's rank of node
NRmin ← the minimum node's rank of node

NRmc(i) ← the instantaneous node's rank of node i
Wi ← willingness of node i∈V

***Get** NRmc(i) of node i*

if** NRmc (i) < NRmin **then
*Wi = WILL_NEVER // **0***
else if** NRmc(i) ≥ 0,75 × NRmax **then
*Wi = WILL_ALWAYS // **15***
else if** 0.50∗ NRmax ≤NRmc(i)<0,75×NRmax **then
*Wi = WILL_HIGH // **14***
else if** 0.25∗ NRmax ≤NRmc(i)<0,50×NRmax **then
*Wi = WILL_DEFAULT // **7***
else
*Wi = WILL_LOW // **1***
end if

***return** Wi*

L'algorithme de la sélection des nœuds MPR est similaire à celui du mécanisme MBQA-OLSR et MBMA-OLSR sauf que la différence réside au niveau des paramètres prises en considération lors de choix de la volonté *(Willingness)* sur chaque nœud du réseau MANET.

L'algorithme de Calcul du coût du lien ***(****Link Cost Calculation)* est illustré comme suit **:**

G(V; E) ← graph of V node set and E link set

NRmc(i) ← MCNR metric value for node; i 3 *V*

NRmc(j) ← MCNR metric value for node; j 3 *V*

NRmc(i; j) ← rank of the link, L(i; j) between nodes i and j , L(i; j) ∃*E*

Lcost(i; j) ← cost of link L(i; j) based on the MCNR metric of i and j

Get *NRmc(i), NRmc(j) for each link L(i; j) in E*

if *NRmc(i)* ≥ *NRmin* ***&&*** *NRmc(j)* ≥ *NRmin* ***then***

Calculate *NRmc(i; j) // voir équation* $\boldsymbol{NR_{mc}(i,j) = [NR_{mc}(i) + NR_{mc}(j)]/2}$

Calculate *Lcost(i; j) // voir l'équation* $\boldsymbol{L_{cost}(i,j) = 1 + k * [NR_{max}/NR_{mc}(i,j)]}$

else

Lcost(i; j) = MAX_Lcost

end if

return *Lcost(i; j)*

CHAP VI. ETUDE COMPARATIVE DES SOLUTIONS D'OPTIMISATION D'ENERGIES DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS MOBILES SANS FIL

VI.1. Introduction

Dans ce travail de recherche, on a essayé de faire une comparaison entre ces solutions ci hautes proposées par des différents chercheurs dans le but de trouver une méthode ou un mécanisme adéquate à l'optimisation de la consommation d'énergie et la qualité de services dans les réseaux ad hoc mobiles MANET ainsi que dans les réseaux de capteurs sans fils. Des nombreuses évaluations de performances sur certaines analyses statistiques et des métriques de performances ont été évaluées. Cette comparaison sera détaillée dans les sections suivantes.

VI.2. Comparaison entre (EIMO)ESOLSR et d'autres méthodes à chemins uniques

Le tableau nous montre d'une façon brève une comparaison entre les mécanismes à chemins uniques et ceux nécessitant le choix sécurisé des MPR comme illustre dans ce tableau ci-dessous.

Tableau 3. Comparaison entre ESOLSR et autres solutions à chemins uniques

Caractéristiques	EE-OLSR [48]	REOLSRv2 [49]	FQOLSR [50]	ELSQ [51]	MBQA-OLSR [52]	ES-MPR
Energie Résiduelle	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Taux de consommation d'énergie (Drain Rate)	Oui	Non	Non	Non	Oui	Oui
Bande passante disponible	Non	Non	Non	Non	Non	Oui
Occupation de la file d'attente	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Taux de perte de Hello	Non	Non	Non	Non	Non	Oui
Puissance d'émission	Non	Non	Non	Non	Non	Oui
Stabilité du signal	Non	Non	Oui	Oui	Non	Oui
Mécanisme d'incitation	Non	Non	Non	Non	Non	Oui

On remarque que la méthode ESOLSR avec son mécanisme ES-MPR lors de choix des MPR énergétiques sûrs et stables, est plus performante que les autres méthodes à savoir EE-OLSR, REOLSRv2, FQOLSR, ELSQ et MBQA- OLSR en minimisant l'énergie consommée par paquet et

en augmentant la durée de vie du réseau et le taux de livraison des paquets d'après les résultats du simulateur NS2.

En plus, on va voir aussi une comparaison entre la méthode EIMO-ESOLSR et ESOLSR ainsi que ces précédentes selon leur comportement face à l'optimisation d'énergies dans des réseaux MANET et WSN comme suit :

1. Le mécanisme EIMO-ESOLSR proposé donne une consommation d'énergies minimale par paquet de 0,325 J à 45 % des nœuds qui se comportent mal, en raison de la prise en compte de la puissance de transmission requise pour communiquer avec le nœud MPR par rapport à d'autres algorithmes considérés.
2. EIMO-ESOLSR montre la durée de vie du réseau la plus élevée de 4700 s à 10% de nœuds qui se comportent mal par rapport à d'autres algorithmes considérés.
3. Cela est dû à une considération accordée à la puissance de transmission, à la sécurité, à la stabilité et à la durée de vie lors de la sélection d'un nœud MPR.
4. La méthode proposée EIMO-ESOLSR a un taux de livraison de paquets plus élevé soit de 28, 44, 25 et 24% par rapport à ES-MPR, ELSQ, EE-OLSR et REOLSR2.

Les mesures de sécurité et d'énergies utilisées dans EIMO-ESOLSR garantissent le choix des MPR énergétiques sûrs et stables ; formant ainsi une topologie fiable, sécurisée et durable dans le réseau contrairement à ES-MPR, ELSQ, EE-OLSR et REOLSR, qui sélectionnent le nombre maximum de MPR par rapport à cette méthode EIMO-ESOLSR proposée.

Après la simulation avec le simulateur NS2, on remarque que le mécanisme EIMO-ESOLSR est plus performant que ESOLSR en minimisant considérablement l'énergie consommée et en augmentant le taux de livraison de paquets et la durée de vie du réseau.

Pour l'évaluation des performances, le simulateur réseau NS-2 est utilisé pour simuler le réseau. Le résultat expérimental montre de meilleures performances du modèle EIMO-ESOLSR que le modèle ES-MPR, ELSQ, EE-OLSR et REOLSR2 existant en termes de la consommation d'énergie, d'une durée de vie du réseau, de nombre de MPR inondables et de rapport de livraison de paquets.

VI.3. Comparaison entre les méthodes à chemins multiples

Comme le montre les sections précédentes, les méthodes à chemins multiples proposées pour optimiser l'énergie dans les réseaux MANET/ WSN sont MBQA-OLSR, MBMA-OLSR et

MEQSA-OLSRv2. La comparaison de ces solutions doit se faire progressivement deux à deux jusqu'à une étude comparative globale.

VI.3.1. Comparaison entre les méthodes MBMA-OLSR et MBQA-OLSR

La comparaison entre ces mécanismes est décrite dans les sections suivantes.

Tableau 4. Comparaison entre MBMA-OLSR et MBQA-OLSR

	MBMA-OLSR	**MBQA-OLSR**
Sélection des MPR	Utilise le mécanisme EMA-MPR avec la métrique MCNR prenant en compte la mobilité des nœuds	Utilise le mécanisme EA-MPR avec la métrique MCNR ne prenant pas en compte la mobilité des nœuds
Mobilité	est capable de gérer les nœuds à moyenne mobilité et de sélectionner les meilleurs chemins multiples vers les destinations dans un environnement dynamique de grande taille dont les nœuds sont mobiles.	fonctionne mieux dans les scénarios statiques ; cela pourrait être attribué à la sélection des itinéraires les plus stables dans de tels environnements.
Energie	Il est clair que l'énergie résiduelle de la batterie dans le MBMA-OLSR est légèrement supérieure à celle du protocole MBQA-OLSR dans tous les cas.	
Délai de bout à bout	À 10 m/s, le protocole MBMA-OLSR peut réduire le délai à 0,87 seconde contre 1,1 seconde pour le MBQA-OLSR à la même vitesse.	
Débit	Le MBMA-OLSR a atteint un débit de données jusqu'à 16 % supérieur à celui du MBQA-OLSR à la vitesse de 3 m/s.	
Temps de transmission de données	Le MBMA-OLSR réduit le temps de transmission en sélectionnant les nœuds à faible vitesse avec un niveau de batterie élevé pour fonctionner comme MPR.	

On va voir aussi la comparaison entre ces deux solutions proposées dans les tableaux suivants:

Tableau 5. Délai de bout en bout en sec pour temps de pause variable

Temps de pause [Seconde]							
Schéma de routage	**0**	**10**	**20**	**40**	**80**	**160**	**320**
MBMA-OLSR	0.91	0.87	0.95	1.13	0.95	0.98	1.36
MBQA-OLSR	1.04	1.06	1.02	1.17	1.19	1.17	1.50

Tableau 6. Nombre de Paquets libérés dans la file d'attente FIFO selon un temps de pause

Temps de pause [Seconde]								
Schéma de routage		**0**	**10**	**20**	**40**	**80**	**160**	**320**
MBMA-OLSR	Mean (Moyenne)	331	329	329	365	358	322	324
	Minimum	229	205	198	229	257	188	195
	Maximum	427	408	410	430	434	405	429
MBQA-OLSR	Mean (Moyenne)	372	372	370	385	406	394	353
	Minimum	251	223	241	238	270	225	196
	Maximum	514	544	518	501	530	506	485

Tableau 7. Nœuds Morts Vs Temps De Pause

Temps de pause [Seconde]								
Schéma de routage		**0**	**10**	**20**	**40**	**80**	**160**	**320**
MBMA-OLSRv2	Mean (Moyenne)	31	30	28	29	29	26	21
	Minimum	22	23	19	22	23	23	12
	Maximum	38	38	37	36	35	29	31
MBQA-OLSRv2	Mean (Moyenne)	35	34	33	34	34	32	25
	Minimum	30	30	29	30	29	29	18
	Maximum	39	38	37	37	37	34	34

VI.3.2. Comparaison de mécanismes MEQSA-OLSRv2, MBMA-OLSR et MBQA-OLSR

1) L'utilisation du mécanisme EQSA-MPR pour sélectionner des nœuds à faible vitesse, à faible trafic et à énergie résiduelle élevée pour agir en tant que des nœuds MPR afin de limiter le nombre de trafic de contrôles, réduit la surcharge du protocole MEQSA-OLSRv2 par rapport aux autres protocoles à savoir MBMA-OLSR et MBQA-OLSR.
2) MEQSA-OLSRv2 surpasse tous les schémas et atteint zéro paquet abandonné dans certains scénarios car il diminue la probabilité de défaillance de la liaison et, par conséquent, aucun paquet de données n'est envoyé sur des routes non fiables.

3) MEQSA-OLSRv2 peut également réduire considérablement le nombre de nœuds morts, réduire le coût énergétique par paquet et augmenter l'énergie résiduelle moyenne de la batterie dans les scénarios MANET courants.
4) MEQSAOLSRv2 réduit la consommation d'énergies et améliore l'efficacité énergétique sans ignorer d'autres métriques de performance QoS, telles que le PDR, le délai de bout en bout et la surcharge normalisée.
5) MEQSA-OLSRv2 bénéficie de sa prise en compte simultanée des métriques d'énergies, de mobilité et de QoS lors de la détection de la topologie via les MPR et du calcul de routes multiples.
6) Contrairement aux algorithmes existants, l'approche MEQSA-OLSRv2 a agrégé plusieurs critères liés à l'énergie et à la qualité de service en une seule métrique pour prendre une décision de routage et une sélection des nœuds MPR.
7) Ainsi, MEQSA-OLSRv2 a évité la sélection de nœuds à mobilité élevée, à faible énergie de batterie et à forte congestion dans l'ensemble des nœuds MPR et à plusieurs chemins. De plus, MEQSAOLSRv2 a montré la capacité de forcer les nœuds inactifs dans les activités de transmission de données et de détection de topologie au lieu de les faire consommer l'énergie pour rien.
8) En fournissant plusieurs chemins disjoints avec prise en compte d'énergie et de la qualité de service, MEQSA-OLSRv2 est devenu plus résistant aux échecs de routage, en particulier dans les scénarios à fort trafic.

VI.3.3. Comparaison sur la structure et modèle de traitement de données

La structure et le modèle de traitement de chaque mécanisme à chemins multiples à savoir ceux de MBQA-OLSR, MBMA-OLSR et MEQSA-OLSRv2 nous aident aussi à analyser une comparaison entre eux car l'implémentation de chaque méthode prend en compte des métriques différentes à une autre, ceux qui lui permettent d'apporter des différentes performances lors de l'optimisation d'énergie et de la qualité de services dans des réseaux MANET et WSN. On va voir sur chaque méthode sa structure et son modèle de traitement de données dans la suite de ce point :

1) Structure et modèle de traitement de données du mécanisme MBQA-OLSR

Cette solution MBQA-OLSR implémente des méthodes relatives au réseau et au trafic de données basées sur le modèle de la batterie, le modèle de la durée de vie, le modèle d'énergie et le modèle

de file d'attente pour optimiser la consommation d'énergie. MBQA-OLSR assure aussi le choix des MPR énergétiques à l'aide d'un mécanisme EA-MPR à base du modèle d'énergie et de la durée de vie, en plus elle assure le calcul de routes fiables à l'aide d'algorithme de sélection de chemins multiples lors de la transmission de données entre un nœud source et un nœud de destination

Donc la Structure et le modèle de traitement de données d'un mécanisme MBQA-OLSR sont représentés sur la figure suivante.

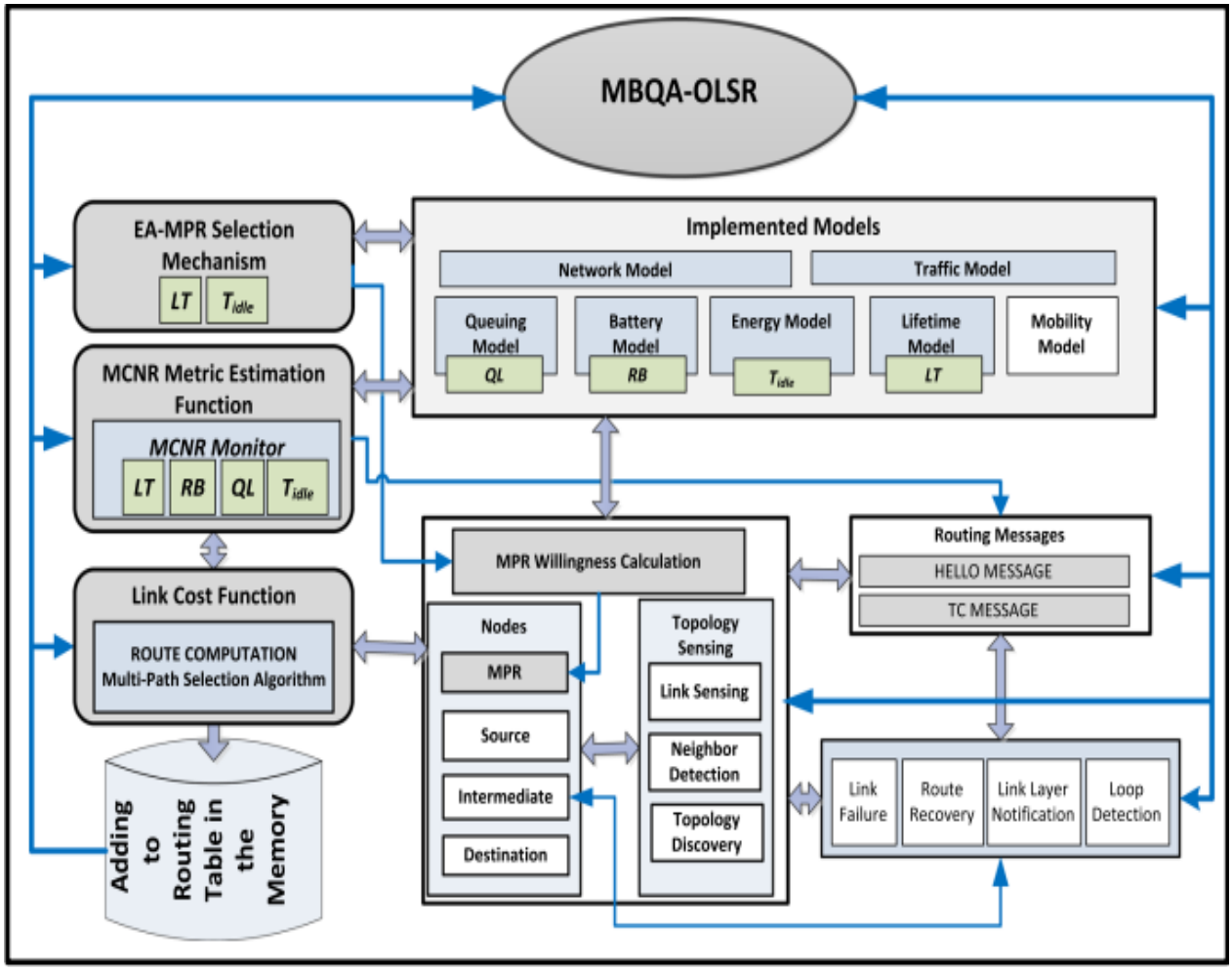


Figure 12. Structure MBQA-OLSR et son modèle de traitement de données

2) Structure et modèle de traitement de données d'un mécanisme MBMA-OLSR

Comme MBQA-OLSR, MBMA-OLSR implémente aussi des méthodes relatives au réseau et au trafic de données basées sur le modèle de la batterie, le modèle de la durée de vie, le modèle d'énergie et le modèle de la mobilité pour optimiser la consommation d'énergie. MBMA-OLSR assure aussi le choix des MPR énergétiques à l'aide d'un mécanisme EMA-MPR à base du modèle d'énergie ; de la durée de vie et de la mobilité, en plus elle assure le calcul de routes fiables à l'aide

d'algorithme de sélection de chemins multiples lors de la transmission de données entre un nœud source et un nœud de destination

Donc la Structure et le modèle de traitement de données d'un mécanisme MBMA-OLSR sont représentés sur la figure suivante.

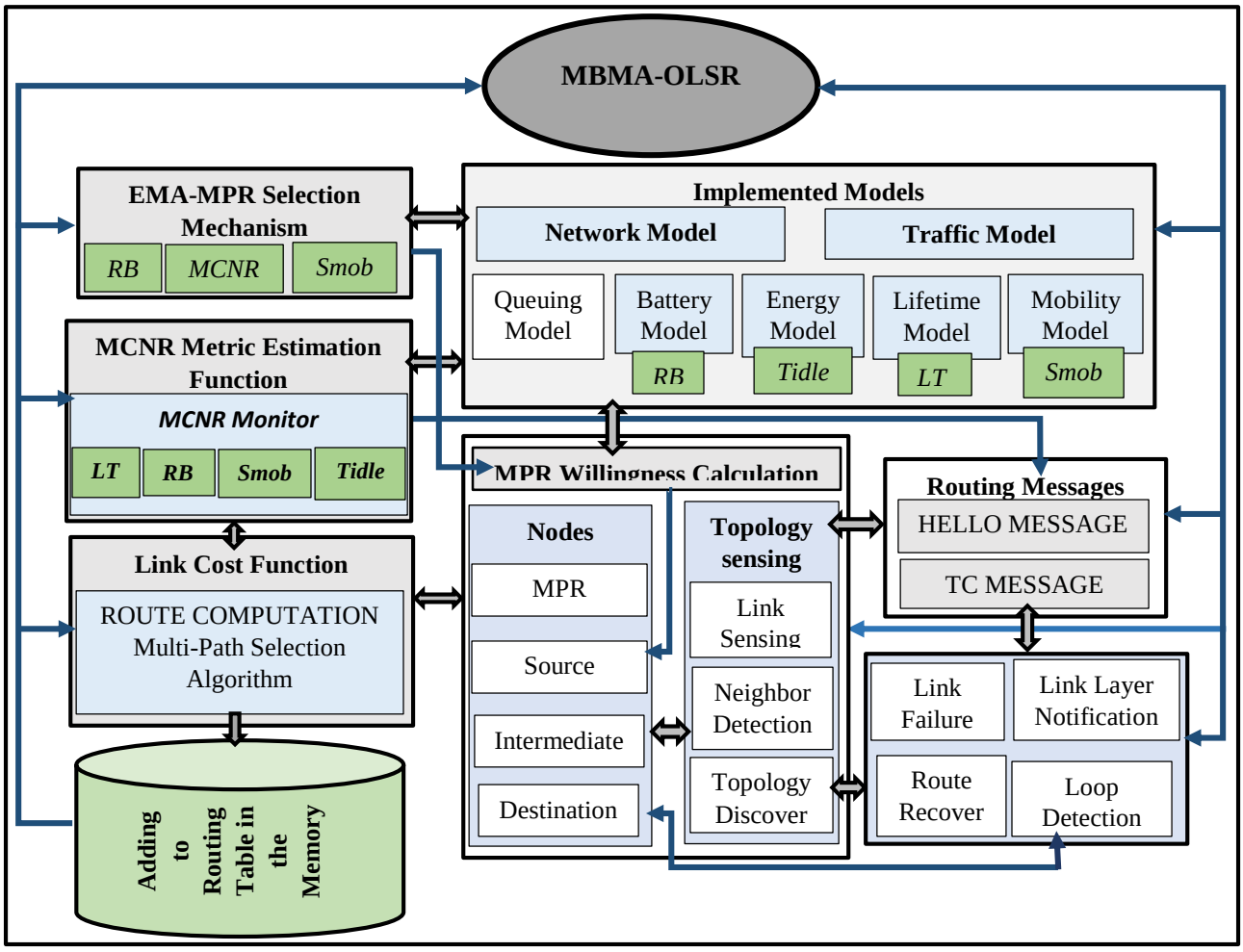


Figure 13. Structure MBMA-OLSR et son modèle de traitement de données

3) Structure et modèle de traitement de de données du mécanisme MEQSA-OLSRv2

La structure et le modèle de traitement du mécanisme MEQSA-OLSR est la combinaison de ces deux mécanismes précédents (MBQA-OLSR et MBMA-OLSR) car ils implémentent leurs modèles du réseau et du trafic basé sur le modèle de la batterie, le modèle d'énergie, le modèle de la durée de vie, le modèle de la file d'attente et le modèle de la mobilité.

Son mécanisme de choix des MPR énergétiques est EQSA-MPR basé sur les métriques énergétiques multicritères, en plus elle assure le calcul de routes fiables à l'aide d'algorithme de sélection de

chemins multiples lors de la transmission de données entre un nœud source et un nœud de destination

Donc la Structure et le modèle de traitement de données d'un mécanisme MEQSA-OLSR sont représentés sur la figure suivante.

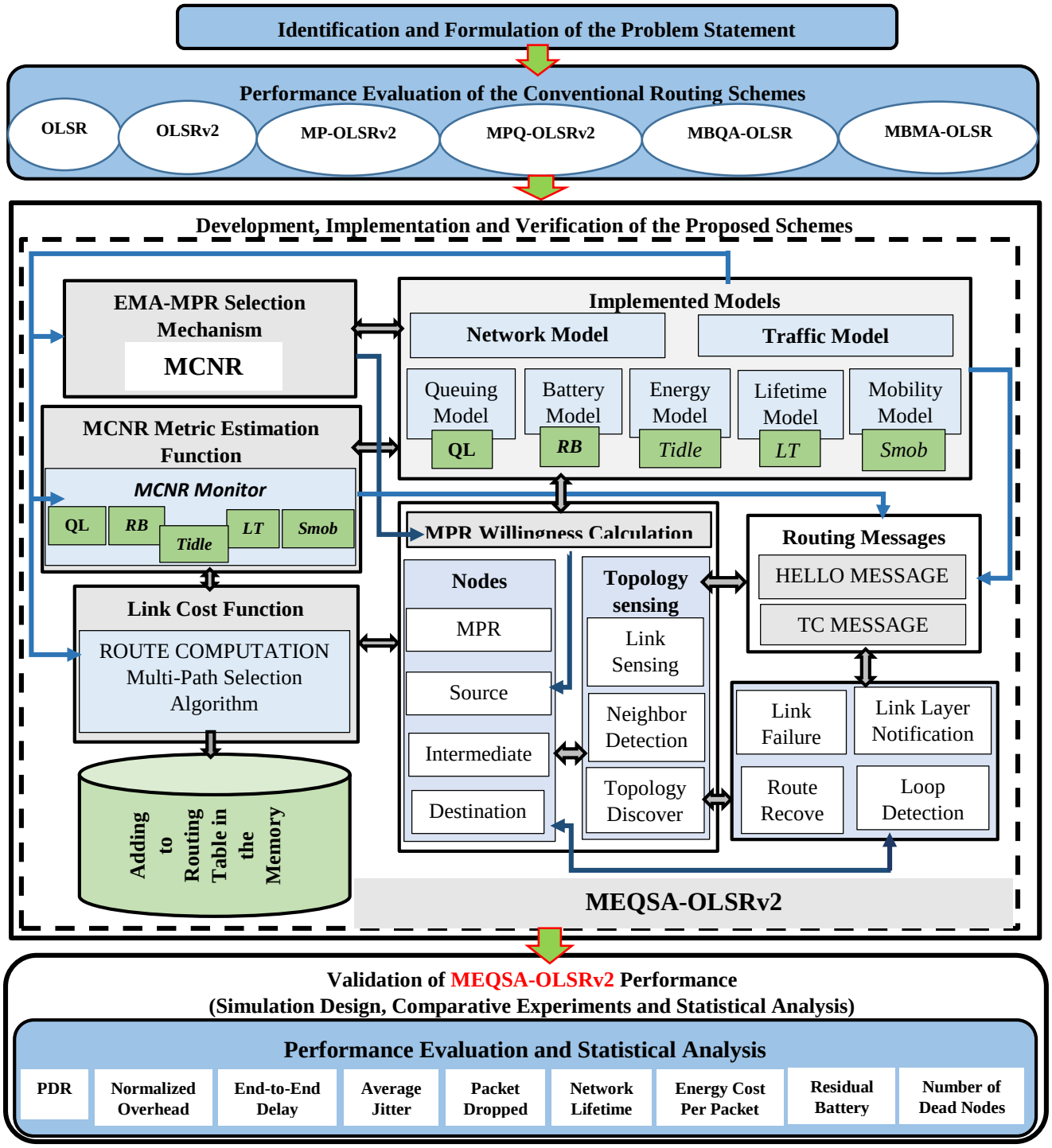


Figure 14. Structure, fonctionnalités de MEQSA-OLSRv2 et modèle de traitement de données

Tableau 8. Fonctionnalités des mécanismes d'optimisation d'énergies avec OLSR

Solutions ou mécanismes	**Fonctionnement**	**Taille et type du réseau**	**Qualité de service QoS**	**Niveau d'optimisation d'énergie**	**Énergie restante de la batterie (RBE)**	**La durée de vie (LT)**
M-OLSR	Cette technique dépend de la capacité énergétique des nœuds intermédiaires pour trouver le chemin de données à emprunter, si elle atteint le seuil (donné par l'utilisateur), alors un nœud choisira un autre chemin.	petite taille à chemin unique	faible	faible	Très faible	➢ Bonne pour les non MPR ➢ Mauvaise pour les MPR
EI-OLSR	permet une consommation d'énergies équitables dans un même ensemble de MPR en empêchant les nœuds à faible puissance dans un processus de routage afin de maintenir des valeurs de puissance similaires pour tous les nœuds mobiles.	petite taille à chemin unique	faible	moyen	Faible	➢ Bonne pour les non MPR ➢ Mauvaise pour les MPR
EEPR-OLSR	utilise le GPS pour récupérer des informations sur les nœuds afin de calculer le chemin le plus stable trouvé à partir de la valeur de Link Expiration Time (LET)	moyenne taille à chemin unique	moyenne	meilleur	Faible	➢ Bonne pour les non MPR ➢ Bonne pour les MPR
OPE-OLSR	essaye de privilégier les nœuds de N1 ayant une énergie plus élevée pour être un MPR. Si plusieurs nœuds ont la même valeur d'énergie, on choisit le nœud MPR qui couvre plus de nœuds dans N2.	moyenne taille à chemin unique	moyenne	bon	Faible	➢ Bonne pour les non MPR ➢ Bonne pour les MPR

Solutions ou mécanismes	Fonctionnement	Taille et type du réseau	Qualité de service QoS	Niveau d'optimisation d'énergie	Énergie restante de la batterie (RBE)	La durée de vie (LT)
EEM-OLSR & LE-OLSR	utilise un niveau d'énergies résiduelles pour déterminer la valeur du champ "volonté" *(Willingness)* en se basant sur la valeur du seuil d'énergie donnée (***energy_threshold***) et on en déduit la valeur de volonté qui peut être *OLSR_WILL_NEVER(=0) ; OLSR_WILL_LOW(=1) ; OLSR_WILL_DEFAULT(=6) ; OLSR_WILL_HIGH (=7).*	grande taille à chemin unique	moyenne	bon	Moyenne	➢ Moyenne pour les non MPR ➢ Moyenne pour les MPR
EOLSR	fixe les valeurs de seuil pour RE et CE pour trouver la valeur de ***Willingness*** : Si l'énergie résiduelle du nœud est inférieure à la valeur fixée du seuil, le nœud est réglé sur LOW-MPR-WILL, sinon il est réglé à HIGH-MPR-WILL. Et si l'énergie consommée par le nœud est inférieure à la valeur fixée du seuil, le nœud prend la valeur HIGH-MPR-WILL sinon il prend la valeur LOW-MPR-WILL.	grande taille à chemin unique et à faible mobilité	bonne	Très bon	Moyenne	➢ Moyenne pour les non MPR ➢ Bonne pour les MPR
EE-OLSR	prendre en compte la capacité de la batterie et la durée de vie prédite (***Lifetime)***, basée sur le taux d'épuisement d'énergie d'un nœud pour déterminer la valeur de la volonté	grande taille à chemin unique et à une moyenne mobilité	bonne	meilleur	Bonne	➢ Moyenne pour les non MPR ➢ Bonne pour les MPR

Solutions ou mécanismes	Fonctionnement	Taille et type du réseau	Qualité de service QoS	Niveau d'optimisation d'énergie	Énergie restante de la batterie (RBE)	La durée de vie (LT)
	(Willingness) d'un nœud, utile lors de choix des MPR					
EM-OLSR	La sélection des nœuds MPR prend en compte la valeur du paramètre Volonté (*Willingness*) calculée à partir de deux métriques dont l'énergie, la durée de vie prédite et la mobilité du nœud à base des seuils fixés. Prend aussi en considération le degré et l'accessibilité d'un nœud mobile à un saut.	grande taille à chemin unique et à forte mobilité	Très bonne	meilleur	Bonne	➢ Moyenne pour les non MPR ➢ Moyenne pour les MPR
ES-OLSR	détermine les paramètres de sélection des MPR à l'aide de la volonté *(Willingness)* d'un nœud calculé à partir de sa durée de vie prédite, sa bande passante disponible et son occupation dans la file d'attente, et aussi à l'aide de l'indice d'éligibilité composite calculé à partir de la probabilité d'un mauvais comportement des MPR, du comportement de transfert et de facteur de puissance d'un nœud. En plus il prend en compte le degré et l'accessibilité d'un nœud	Grande taille à chemin multiple et à faible mobilité	bonne	moyen	Très bonne	➢ Meilleure pour les non MPR ➢ Moyenne pour les MPR
EIMO-ESOLSR	C'est ESOLSR amélioré avec un optimiseur EIMO	Grande taille à chemin	Très bonne	Bon	Très bonne	➢ Moyenne pour les non MPR

Solutions ou mécanismes	Fonctionnement	Taille et type du réseau	Qualité de service QoS	Niveau d'optimisation d'énergie	Énergie restante de la batterie (RBE)	La durée de vie (LT)
		multiple et à faible mobilité				➢ Meilleur pour les MPR
MBA-OLSR	Choisisse une meilleure route de données par l'algorithme de Dijikstra en calculant l'énergie résiduelle des batteries (***TLV_Residual_Battery***), le cout des liens (***TLV_Link_Cost***) et leurs mobilités (***TLV_Mobility***) qui sont encapsulées dans un champ TVL des messages Hello et TC échangés entre les nœuds du réseau MANET.	Grande taille à chemin multiple et à faible mobilité	bonne	bon	Bonne	➢ Moyenne pour les non MPR ➢ Moyenne pour les MPR
MBQA-OLSR	Envisage la sélection des nœuds MPR en calculant la valeur de la volonté d'un nœud basé sur une longue durée de vie prédite et un très court temps d'inactivation *(higher lifetime && lower Idle time).* En plus le degré d'un nœud à un saut ainsi que son accessibilité peuvent aussi être pris en considération. Ce mécanisme détermine aussi l'itinéraire à l'aide de rang multicritère d'un nœud et l'algorithme de DIJIKSTRA.	Très grande taille à chemins multiples et à moyenne mobilité	meilleur	bon	Très bonne	➢ Meilleur pour les non MPR ➢ Moyenne pour les MPR
MBMA-OLSR	Détermine la sélection des nœuds MPR tenant en compte des rangs multicritères d'un nœud constitués par l'énergie résiduelle de la batterie RB, la durée de	Très grande taille à chemins	bonne	meilleur	Très bonne	➢ Meilleure pour les non MPR

Solutions ou mécanismes	Fonctionnement	Taille et type du réseau	Qualité de service QoS	Niveau d'optimisation d'énergie	Énergie restante de la batterie (RBE)	La durée de vie (LT)
	vie prédite LT et la vitesse de la mobilité Smob pour trouver la valeur de la volonté d'un nœud. En plus de ces critères, il prend aussi en compte le degré et l'accessibilité d'un nœud à un saut lors de choix des nœuds MPR	multiples et à forte mobilité				➢ Moyenne pour les MPR
MEQSA-OLSRv2	Détermine la sélection des nœuds MPR tenant en compte des rangs multicritère d'un nœud constitués par l'énergie résiduelle de la batterie RB, la durée de vie prédite LT, la file d'attente QL, le temps d'inactivation Tidle, et la vitesse de la mobilité Smob pour trouver la valeur de la volonté d'un nœud. En plus de ces critères, il prend aussi en compte le degré et l'accessibilité d'un nœud à un saut lors de choix des MPR. Ce mécanisme détermine aussi le coût de liaison à l'aide des rangs multicritères d'un nœud.	Très grande taille à chemins multiples et à forte mobilité	meilleure	meilleur	Meilleure	➢ Meilleure pour les non MPR ➢ Meilleur pour les MPR

Tableau 9. Comparaison des solutions proposées pour optimiser l'énergie dans MANET

Schéma de routage	Métriques considérées			Mécanismes de routage	Chemin de transmission de données	Fonctionnalités modifiées		Complexité
	Conservation de l'énergie	Qualité de Services QoS	Mobilité			Sélection des MPR	Calcul d'itinéraire	
EE-OLSR	Oui	Non	Non	Proactive	Simple (Single)	Oui	Non	Faible
ESM-OLSR	Oui	Non	Non	Proactive	Simple (Single)	Oui	Non	Faible
QMPR-OLSR	Oui	Oui	Oui	Proactive	Simple (Single)	Oui	Non	Elevée
EM-OLSR	Oui	Non	Oui	Proactive	Simple (Single)	Oui	Non	Elevée
EA-OLSR	Oui	Non	Non	Proactive	Simple (Single)	Non	Oui	Moyenne
EMA-OLSR	Oui	Non	Non	Proactive	Simple (Single)	Non	Oui	Faible
EPA-OLSR	Oui	Non	Non	Proactive	Simple (Single)	Oui	Oui	Faible
E-OLSR	Oui	Non	Non	Proactive	Simple (Single)	Oui	Oui	Moyenne
EI-OLSR	Oui	Non	Non	Proactive	Simple (Single)	Oui	Oui	Faible
ESOLSR	Oui	Oui	Non	Hybride	Multi chemin	Oui	Non	Moyenne
EIMO-ESOLSR	Oui	Oui	Non	Hybride	Multi chemin	Oui	Non	Faible
MBQA-OLSR	Oui	Oui	Non	Hybride	Multi chemin	Oui	Oui	Faible
MBMA-OLSR	Oui	Non	Oui	Hybride	Multi chemin	Oui	Oui	Faible
MEQSA-OLSRv2	Oui	Oui	Oui	Hybride	Multi chemin	Oui	Oui	Très Faible

Conclusion sur ce chapitre

Selon l'analyse ci-dessus, on conclut que parmi les solutions envisagées pour optimiser l'énergie dans des réseaux de capteurs sans fil et mobile MANET/WSN, les plus performantes sont entre suivantes par ordre de performances : MEQSA-OLSRv2, EIMO-EOLSR, MBMA-OLSR et MBQA-OLSR.

Toutes ces solutions évoquées sont basées sur le mécanisme de choix de nœuds MPR qui sont plus important lors du routage et de traitement de données pour faire une optimisation de la consommation d'énergie dans des réseaux de capteurs sans fil et mobile, en prenant en compte des différentes métriques de performance pendant le processus de calcul de la volonté (*Willingness*) de chaque nœud du réseau, de la mobilité des nœuds mobiles ainsi que de l'indice d'éligibilité composite.

On propose alors un mécanisme d'optimisation d'énergie dans des réseaux de capteurs sans fil et mobile WSN/MANET à l'aide du protocole OLSR en combinant le processus amélioré d'optimisation d'énergie et de transfert de données sans perte, prenant en compte le choix sécurisé des MPR énergétiques sûrs et stables, et les autres paramètres comme : la mobilité, $RB(i)$, $Tidle(i)$, $QL(i)$, $Smob(i)$, $LT(i)$, NRi. En plus on doit implémenter dans ce mécanisme proposé, un processus d'agrégation de données au sein des nœuds MPR dans le but d'éviter la transmission des doublons dans les données qui consomment d'énergies pour rien.

Ce processus doit être modélisé avec MATLAB qui est un logiciel de modélisation mathématique

CHAP VII. APPORTS SCIENTIFIQUES ET PERSPECTIVES

Selon la plupart des mécanismes proposés avec OLSR pour remédier le problème de la consommation d'énergie dans les réseaux MANET/WSN, certains se sont focalisés sur le choix des nœuds MPR de routage et d'inondation à base de la mobilité, du niveau de la batterie, de la durée de vie, de l'occupation de la file d'attente et du temps d'inactivation d'un nœud capteur. Ces mécanismes ne tiennent pas compte de la probabilité d'un mauvais comportement de certains nœuds MPR qui dégradent la qualité de services réseaux en supprimant certains paquets de données envoyés par les nœuds voisins dans le but d'économiser leurs énergies [28, 29].

D'autres ont assuré la lutte contre un mauvais comportement des nœuds responsables (MPR) [40, 41] dans le but d'améliorer la qualité de services réseaux et de l'économie énergétique mais ils ne tenaient pas compte des autres métriques d'optimisation d'énergie dans les réseaux MANET/MWSN comme par exemple la mobilité et la durée d'inactivité des nœuds capteurs.

Ces mécanismes n'ont pas atteint un succès suffisant pour optimiser l'économie d'énergie et la qualité de service dans des réseaux MANET/MWSN à cause que les chercheurs n'ont pas encore pris en considération globale toutes les métriques nécessaires pour remédier ce problème. Car en prenant en compte l'optimisation d'énergie seulement, on risque de perturber la qualité de services réseaux dite au mauvais comportement de certains nœuds MPR.

Après l'analyse et l'étude comparative de ces nobles travaux, on est motivé d'apporter une contribution en envisageant la prise en considération de toutes les métriques d'optimisation d'énergie et de la qualité de services réseaux. Pour arriver à cet objectif, on a proposé une combinaison du mécanisme de la probabilité d'un mauvais comportement et le mécanisme multicritère de choix des nœuds MPR énergétiques et moins mobiles. Ce qui a augmenté la durée de vie du réseau et minimisé considérablement la probabilité d'un mauvais comportement au sein des nœuds responsables MPR, qui néanmoins économisent leurs énergies en supprimant les données nécessitant d'être transférées vers d'autres MPR ou vers une station de base. En plus on propose aussi l'intégration dans cette combinaison ci-après d'un processus d'agrégation de données au sein des nœuds MPR dans le but d'éviter la transmission des doublons ou des données dupliquées qui consomment d'énergies électriques pour rien.

Ce travail met l'accès sur les modèles d'optimisation de la mobilité, les métriques multicritères à envisager lors du choix des MPR énergétiques à savoir la mobilité, l'énergie résiduelle de la batterie des nœuds capteurs, la durée de vie des nœuds capteurs, la durée d'inactivité des nœuds

capteurs, le degré et l'accessibilité des nœuds capteurs à un saut, la bande passante disponible et les index d'éligibilités composite. On va les voir en long et en large dans les sections suivantes.

VII.1. Modèles de la mobilité des nœuds dans les réseaux MANET

Il existe plusieurs modèles assurant la modélisation de la mobilité des nœuds dans des réseaux de capteurs sans fils mobiles MANET [6] dont les plus importants sont entre autres :

1. Des modèles aléatoires (Random Models) englobant les modèles suivants : RWP, RW, RD qui sont les plus utiles en grande partie lors de la surveillance d'un environnement physique tout en évitant des interférences entres les nœuds mobiles.
2. Des modèles avec la dépendance temporaire dont le modèle de Gauss-Markov et le modèle de mobilité aléatoire lisse
3. Les modèles avec les dépendances spatiales qui sont utiles pour déterminer la vitesse en fonction de la forme de l'espace ainsi que ses conditions climatiques.
4. Les modèles avec les restrictions géographiques dont le modèle de la mobilité des chemins et le modèle de la mobilité des obstacles. Ces modèles sont utiles lors de la géolocalisation des cibles dans des opérations militaires et les traitements miniers par exemple.

Dans ce travail, on a envisagé l'optimisation de la mobilité de nœuds mobiles à l'aide d'un modèle de chemins aléatoires RWP dans le but d'optimiser la consommation d'énergie en définissant le temps de pause, la vitesse de déplacement des nœuds, le temps de déplacement ainsi que la direction de nœuds mobiles.

Il faut que le temps de déplacement d'un nœud capteur soit minime par rapport au temps de pause dans le but de minimiser la découverte des routes à chaque instant, qui consomme une énergie non négligeable durant ce processus. La figure suivante nous montre le comportement des nœuds modélisés avec le modèle des chemins aléatoires RWP.

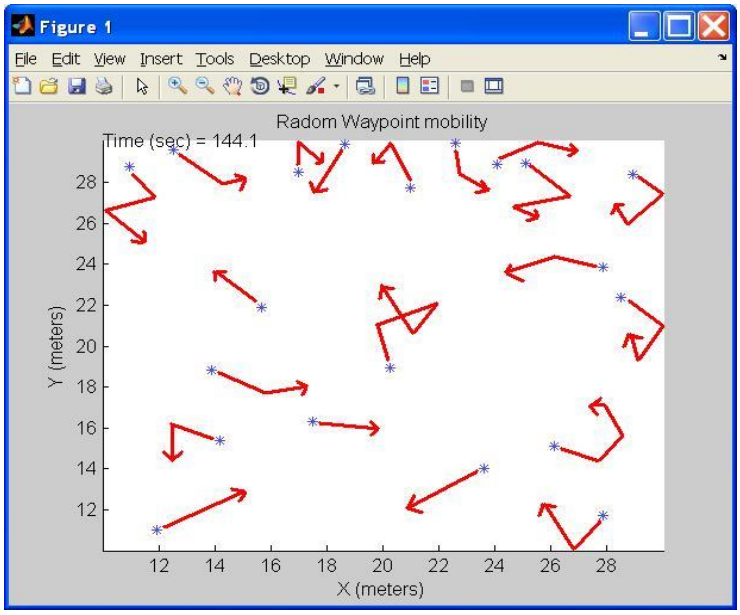


Figure 15. Modèles de la mobilité aléatoire des nœuds RWP

VII.2. Choix des MPR basé sur leurs énergies et leurs comportements

Les métriques utiles prises en considérations pour palier à l'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil et mobile WSN/MANET en utilisant le protocole OLSR, comme on les a évoquées dans les sections précédentes sont entre autres les suivantes :

1. Les métriques de calcul de la volonté des nœuds *(Node Willingness)* qui sont : l'énergie restante dans la batterie *(RB(i) : Residual Baterry),* la durée de temps que le nœud passe dans un état inactif *(Idle Time duration : Tidle),* la durée de vie d'un nœud mobile *(LT(i) : Life Time),* la vitesse d'un nœud mobile *(Mobile Speed : Smob(i)),* le rang d'un nœud (*NR(i) : Node Rank)* ainsi que la longueur de la file d'attente *(QL(i) : Queue Lenght).* Cette solution se base sur le mécanisme EQSA-MPR Willingness settings utiles pour calculer la valeur de volonté de chaque nœud du réseau *(Node's willingness)* dont son algorithme est illustré dans les section précédentes (Voir Chapitre iv-iv.3.4) [28].
2. Les métriques définissant l'indice d'éligibilité composite *(CEI : Composite Elligibility Index)* dont le but est de minimiser la probabilité d'un mauvais comportement qui se manifeste sur certains nœuds responsables MPR, causant ainsi la suppression de données des autres nœuds voisins. Parmi ces métriques, les plus utiles qu'on a voulu utiliser dans ce travail, sont entre autres : la probabilité d'un mauvais comportement *(Misbehaving Probability : MP),* le comportement de transfert des données *(FB : Forward Behavior),*

le facteur de puissance *(PF : Power Factory)* et la bande passante disponible *(Available bandwidth).*

On va voir comment on calcule l'indice d'éligibilité composite utile lors de la sélection des nœuds MPR à base des facteurs suivants : Probabilité d'un mauvais comportement $P_M(v)$; Comportement de transfert *FB(v)* et Facteur de puissance *PF(v).*

A l'aide de ces facteurs, on pourrait calculer la valeur relative à l'indice d'éligibilité composite qui permet de nous indiquer si l'indice trouvée est pour l'inondation, l'acheminement ou le routage d'un paquet de données *(CEIF(v) et CEIR(v)),* varie entre 0 et 15 connaissant que $CEI_{max} = 15$

1. **Probabilité d'un mauvais comportement**

Le nœud *u* détermine la probabilité d'un mauvais comportement d'un nœud *v*, $P_M(u)$ comme suit :

$$P_M(u) = \frac{No.of\ Packets\ of\ u\ dropped\ by\ v}{Total\ packets\ sent\ of\ u\ to\ v} \tag{40}$$

$P_M(u)$ d'un nœud *v* est mis à jour dynamiquement en fonction de sa communication énergétique avec le nœud *u*. Le complément de la probabilité de mauvais comportement est utilisé pour déterminer la valeur de $CEI = 1 - P_M(u)$

2. **Comportement de transfert : Forwarding Behavior**

Un autre paramètre utilisé pour le calcul de CEI est basé sur le comportement de transfert FB d'un nœud *v* tel que déterminé par le nœud *u* est donné par :

$$FB(v) = \frac{P(v,u)}{P(v,u) + P(u,v)} \tag{41}$$

Où *P(v,u)* est le nombre de paquets transmis par le nœud *v* au nom d'un nœud *u*. De même, *P(u,v)* est le nombre de paquets que le nœud *u* a transmis pour le nœud *v*.

3. **Facteur de Puissance : Power Factor**

D'après [46] [47], le calcul du Facteur de puissance **PF** utilisé pendant le calcul du *CEI* est donné par :

$$PF(v) = \frac{TP(v)_{AVG}}{TP_{MAX}} \quad (42)$$

Où *TP(v)* est la puissance de transmission requise pour communiquer avec le nœud *v* et TP_{MAX} est la puissance d'émission maximale autorisée.

Sur base des paramètres discutés ci-dessus, le $CEI_F(v)$ et le $CEI_R(v)$ sont déterminés pour sélection des MPR d'inondation et de routage respectivement.

$$Y_F(v) = \omega_1 \times \big(1 - P_M(v)\big) + \omega_2 \times FB(v) + \omega_3 \times PF(v) \quad (43)$$

$$CIE_F(v) = Y_F(v) \times CIE_{MAX} \quad (44)$$

Où $\omega_1 = 0.35$, $\omega_2 = 0.3$ et $\omega_3 = 0.35$ sont les poids attribués aux différents paramètres. CIE_{MAX} est la valeur maximale de l'indice d'éligibilité composite, soit **15**

$$Y_R(v) = \omega'_1 \times \big(1 - P_M(v)\big) + \omega'_2 \times FB(v) + \omega'_3 \times PF(v) \quad (45)$$

$$CIE_R(v) = Y_R(v) \times CIE_{MAX} \quad (46)$$

Où $\omega'_1 = 0.4$, $\omega'_2 = 0.2$ et $\omega'_3 = 0.4$ sont aussi les poids attribués aux différents paramètres.

4. Métrique de la Bande passante disponible : Available Bandwidth Metric

La bande passante disponible sera calculée en utilisant ***LB*** qui est la bande passante d'un lien entre deux nœuds du réseau et ***IT*** est le temps total qu'un nœud a duré en veille (Idle)**.**

$$\boldsymbol{AB = LB \times IT} \quad (\mathbf{47})$$

On calcule la volonté de la bande passante comme suit :

$$\boldsymbol{M_{AB} = W_{AB} = \frac{AB}{AB_{MAX}}} \quad (\mathbf{48})$$

On en déduit alors la formule du paramètre de sélection décrite de manière suivante sur base du facteur $\phi = 0.6$ toujours **:**

$$SP_F(v) = \phi \times CEI_F(v) + (1 - \emptyset) \times W_{ABF}(v) \quad (49)$$

$$SP_R(v) = \phi \times CEI_R(v) + (1 - \emptyset) \times W_{ABR}(v) \quad (50)$$

Ces deux métriques sont utiles pour assurer le choix des nœuds responsables MPR n'ayant pas aucun mauvais comportement.

L'algorithme de choix des nœuds responsables MPR dans cette méthode est le suivant :

$MPR(s) \leftarrow empty$

$N1(s) \leftarrow one\ hop\ neighbor\ of\ s$

$N2(s) \leftarrow two\ hop\ neighbor\ of\ s$

$SP_{th} \leftarrow 14$

W(u) ← willingness of node u∈V

$SP(u) = SPF(u)\ or\ SPR(u)$

$For\ each\ node\ u \in N1(s)$

if $(W(u) == WILL_Always)$ && $(SP(u) >= SP_{th})\ then$

$add\ node\ u\ to\ MPR(s)$

$else\ if\ (W(u) == WILL_High)$ && $(SP(u) >= SP_{th})$

$add\ node\ u\ to\ MPR(s)$

$Remove\ all\ nodes\ covered\ by\ u\ from\ N2(s)$

$end\ if$

$en\ for$

for ***each node*** *y* ***in*** *N2(s) do*

if ***there is only one node*** *u* ***in*** *N1(s)* ***with*** *D (u, y)* ***is defined*** *then*

Add node *u* ***to MPR****(s)*

Remove nodes in *N2(s)* ***that are covered by*** *x*

end if

end for

while N2(s) ***is not empty,*** *do*

Select node *u* ***in*** *N(s)* ***with non-zero*** *reachability* ***based on the following priority order*** *then*

add node *u* ***to MPR****(s) which has****:***

(a) highest *W(u) and highest SP(u)*

(b) highest *R(u, MPR(s))*

(c) highest *D(u)*

end while

L'architecture de cette solution proposée est la suivante :

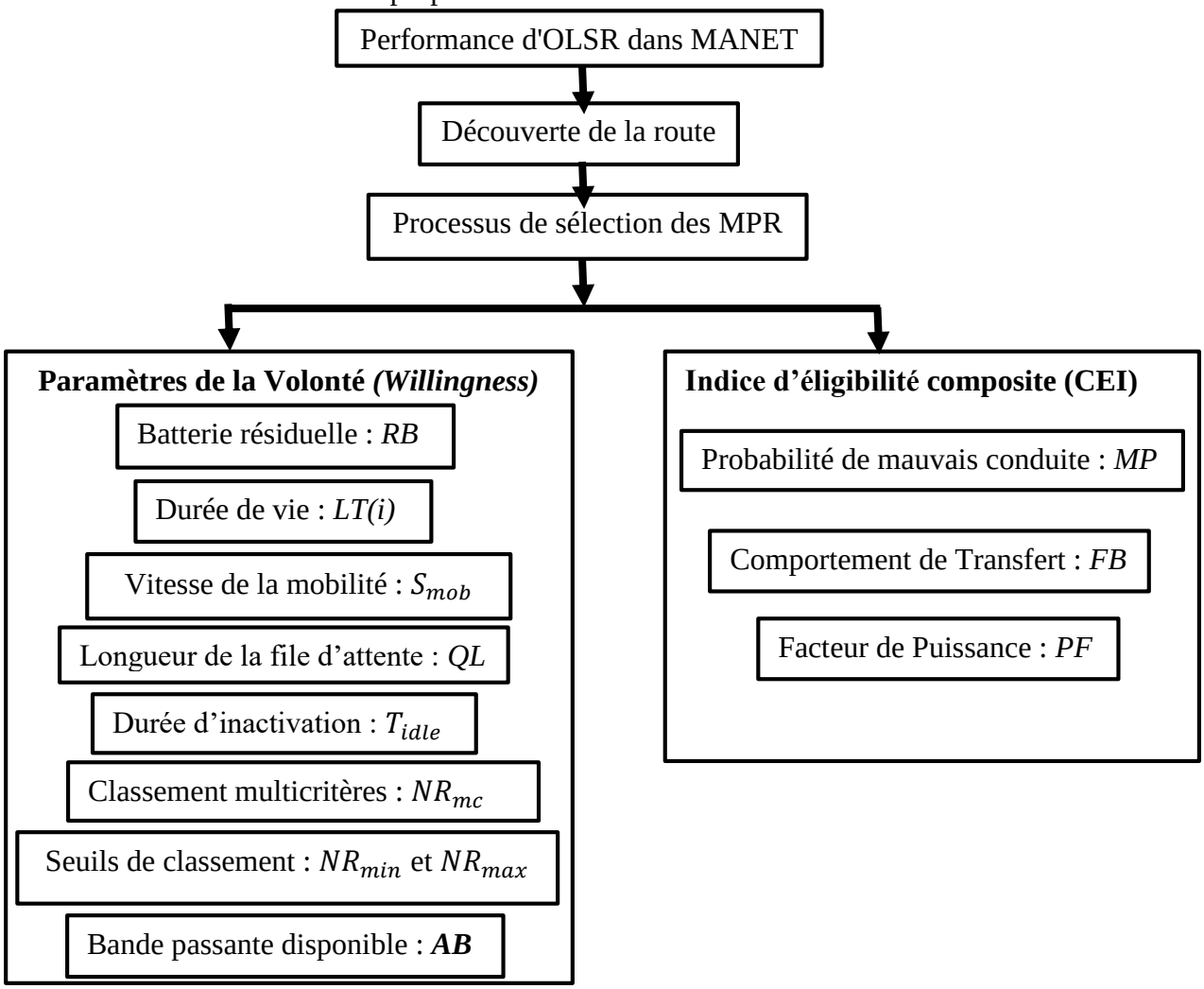


Figure 16. Architecture de modèle proposé pour le choix des MPR

VII.3. Agrégation de données au niveau des nœuds MPR

On propose aussi d'implémenter le mécanisme d'agrégation de données au niveau des nœuds responsables MPR dans le but de minimiser la consommation d'énergie due à l'émission et à la réception d'énormes messages non filtrés ainsi que leur accusé de réception. Car dans toutes les solutions proposées par les chercheurs, aucune n'en parle du mécanisme d'agrégation de données au niveau des nœuds responsables MPR qui assurent des fonctionnalités importantes [46].

Cet objectif définit un mécanisme au niveau des nœuds responsables MPR permettant de combiner en un seul paquet de données toutes les données envoyées par tous les nœuds capteurs couverts par ce nœud MPR avant de les envoyer ou les transférer vers ses voisins MPR ou vers le centre de collecte. C'est le but de supprimer certains doublons et de minimiser l'énergie

consommée durant les phases de réception et de transfert les données directement sans faire une analyse comparative sur ces données captées par les différents nœuds de sa couverture.
Dans ce mécanisme, un nœud MPR doit attendre une durée de temps bien défini en encapsulant dans un seul paquet tous les paquets qu'il reçoive, envoyés par les nœuds de sa couverture.

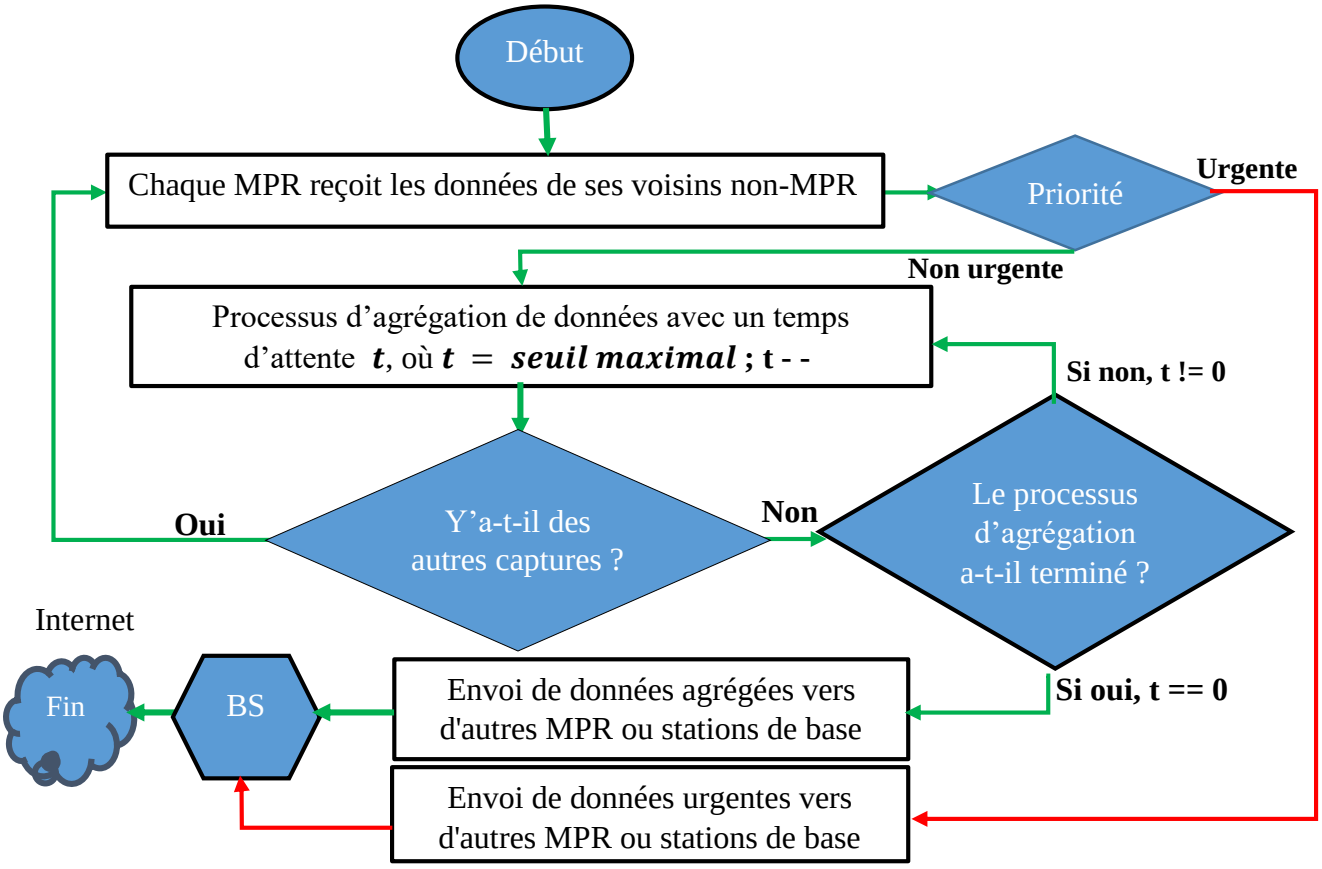


Figure 17. Diagramme des processus d'agrégation de données

VII.4. Comparaison des réseaux MANET/WSN avec et sans agrégation de données

Dans les réseaux de capteurs sans fil et mobile (MANET/WSN), la communication de données entre les nœuds consomme une grande partie de l'énergie totale. Pour cette raison, des techniques d'agrégation de données sont introduites au sein des nœuds MPR responsables de la transmission de données, où elles contribuent grandement à réduire la consommation d'énergie en éliminant les informations redondantes qui sont renvoyées à la station de base (BS) par les nœuds responsables MPR [47] dans le but de mettre à jours les données dans le serveur.

Ce tableau suivant montre les différents avantages et inconvénients entre les réseaux de capteurs sans fil et mobile MANET/WSN avec et sans processus d'agrégation de données au sein des nœuds responsables de la transmission de données.

Tableau 10. Comparaison entre les réseaux MANET/WSN avec et sans agrégation de données

N°	MANET/WSN avec agrégation de données		MANET/WSN sans agrégation de données	
	Avantages	Inconvénient	Avantages	Inconvénient
1	Élimine les données redondantes et conserve l'énergie des nœuds capteurs.	Non applicable dans tous les environnements de détection. Par exemple, si les données transmises par tous les nœuds sont différentes, l'agrégation de données ne peut pas être effectuée.	Peut être appliqué dans tous les environnements de détection de données.	Le nombre et la taille de la transmission des données sont plus élevés et contient la redondance de certaines données.
2	Réduit la taille et le nombre de transmission de données ainsi que la consommation d'énergie	Sujet aux attaques : le nœud agrégateur ou le chef de groupe (MPR ou Cluster Head) peut être attaqué par un attaque malveillant.	Le problème d'écoulement maximal causé par un mauvais routage des données, qui s'est produit dans la transmission de données, peut être facilement résolu à l'aide des contraintes linéaires par un programme entier.	Les nœuds capteurs consomment plus d'énergie tout en transférant plusieurs fois les données redondants d'un nœud à un autre.
3	Avec ce processus, un nœud capteur a la capacité d'agréger plusieurs paquets de données entrants dans un paquet de données unique sortant	Dans certains cas, les nœuds consomment plus de puissance chaque fois que le résultat global est envoyé pour couler à travers des nœuds sans compromis	-	Redondance des données collectées car un nœud de capteur peut collecter les mêmes données à partir de nœuds différents

VII.5. Résultats de la simulation

Le logiciel MATLAB est utilisé pour assurer la simulation de cette solution proposée lors de l'analyse des résultats en tenant compte du nombre de nœuds opérationnels et ceux qui meurent suite à l'épuisement de leurs batteries, le niveau d'énergies consommées et celui d'énergies restantes, et la moyenne d'énergies consommées suivant les différentes fois (rounds) de simulation définies dans ces paramètres de simulations réparties dans le tableau suivant.

Tableau 11. Paramètres de Simulation avec MATLAB

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
Nombre des nœuds	120	Taille de données	4000 bits
Longueur en *X* en m	120	Nombre de tours	5000 rounds
Largeur en *Y* en m	120	Plage de transmission	20
$E_{RX-elect}$ en J/bit	50 ρJ/bit	Alpha α	1
$E_{TX-elect}$ en J/bit	50 ρJ/bit	Gamma γ	0.95
E_{-elect} en J/bit	50 ρJ/bit	Probabilité de comportement p	0.5
e_{amp} en J/bit	100 ηJ/bit	MPR sélecteur *X* en m	60
E_{DA} en J/bit	5 ρJ/bit	MPR sélecteur *Y* en m	60
Drain Rate	11mAhr/s	Mobilité aléatoire	Rand(1,1)

Rappelons que le modèle de consommation énergétique simplifié **[Fig. 10]** pour un couple émetteur-récepteur, nous a aidé à calculer l'énergie consommée $\boldsymbol{E_C}$, qui est la somme d'énergies consommée durant la transmission de données $\boldsymbol{E_{TX}(k,d)}$ et celui consommée au moment de la réception $\boldsymbol{E_{RX}(k)}$. Voir les Equations de (14) – (18).

Avec le processus d'agrégation de données, on admet que l'énergie consommée par un nœud lors de l'agrégation des données de longueur $\boldsymbol{m_bit}$ est formulée comme suit :

$$\boldsymbol{E_{DA} = mE_{elec}\ ou\ EDA = k.E_{elec}} \quad (\mathbf{51})$$

On en déduit alors que l'expression d'énergies consommées suivant le modèle d'agrégation de données dans les réseaux de capteurs sans fils et MANET sera :

$$\boldsymbol{E_C = E_{TX}(k,d) + E_{RX}(k) + E_{DA}} \quad (\mathbf{52})$$

Après simulation de ces paramètres, on aura les résultats suivants :

VII.5.1. Sélection des nœuds responsables MPR

Dans cette simulation avec MATLAB, on vous montre sur la figure suivante que le nœud sélecteur des MPR est celui qui est en rouge et se trouve au milieu de l'espace de travail, les nœuds choisis en tant que des MPR en se basant sur leurs métriques d'optimisation d'énergies et

leur indice d'éligibilité composite pour diminuer la probabilité d'un mauvais comportement, ce sont ceux qui couvrent les autres par des lignes vertes. Rappelons que tous ces nœuds utilisent une communication sans fils pour se communiquer entre eux, en plus c'est le nœud sélecteur des MPR qui doit communiquer directement avec soit les nœuds MPR, ses nœuds symétriques non MPR et la station de base, pour analyser et mettre à jours les données collectées dans un serveur.

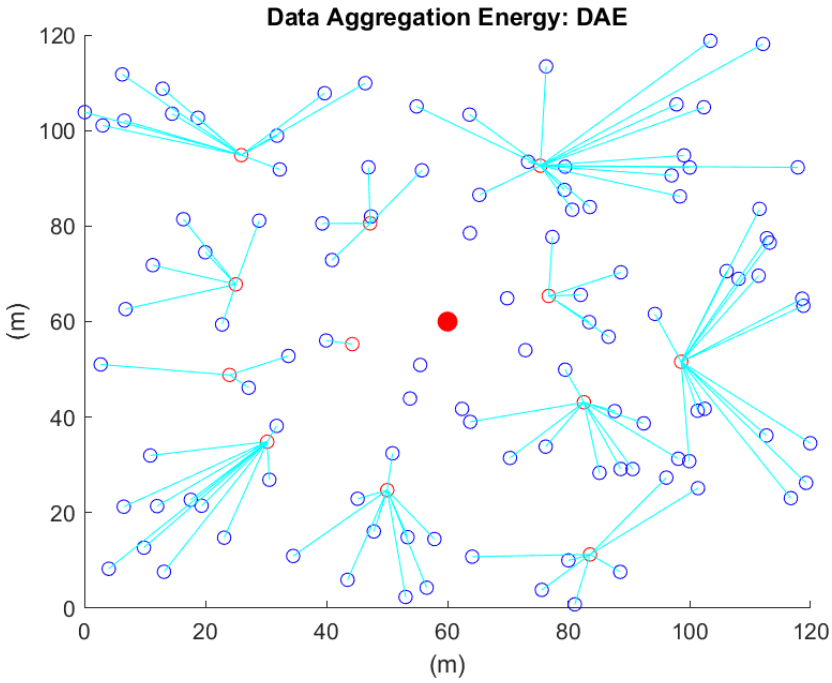
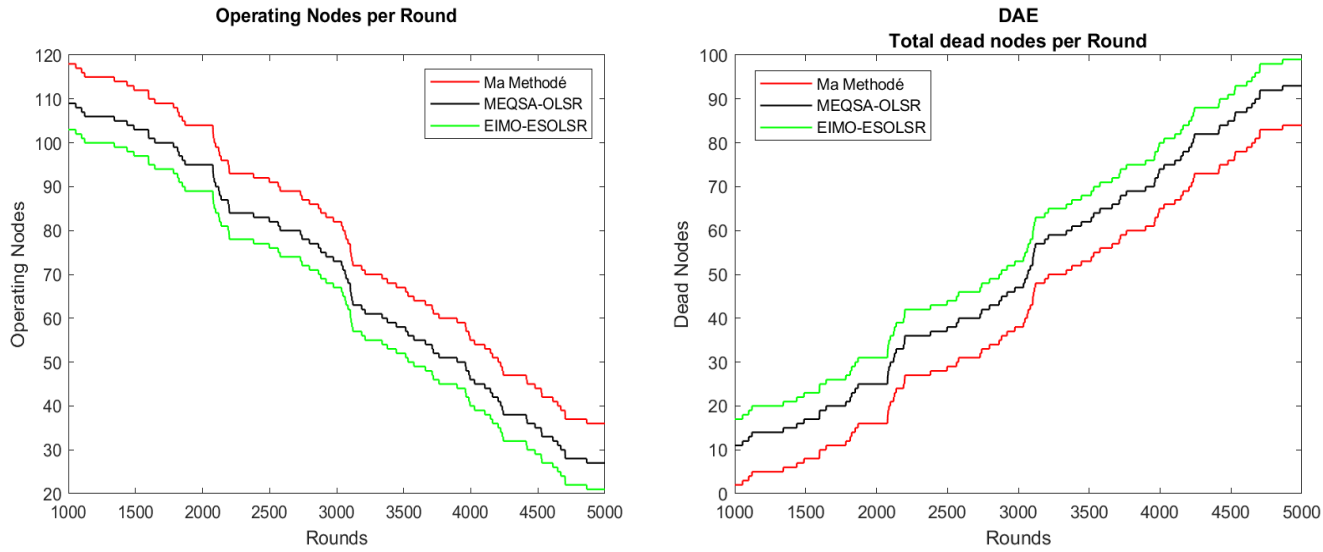


Figure 18. Topologie d'un réseau MANET avec les MPR

VII.5.2. Durée de vie d'un réseau

La durée de vie du réseau dans ce travail de recherche est très améliorée comparativement aux autres solutions analysées car dans cette solution, le nombre des nœuds opérationnels après 5000 fois (tours) de simulation est meilleur par rapport à ceux qui en sont opérationnels dans des autres solutions déjà analysées. En plus il y a une diminution énorme de nombre de nœuds désactivés ou morts par manque d'énergies dans leurs batteries, d'où la durée de vie du réseau dans cette solution est meilleure par rapport aux solutions déjà proposées par d'autres chercheurs.

Les figures suivantes nous montrent les courbes entre le nombre total des nœuds opérationnels après 5000 fois de simulation et le nombre total des nœuds déjà désactivés ou morts après ces nombres de fois de simulation par manque d'énergies résiduelles dans leurs batteries.



a. Nombre de nœuds qui sont en vie b. Nombre de nœuds qui sont morts

Figure 19. Durée de vie d'un réseau MANET/WSN

D'après cette figure, on a un gain de performance compte tenu du nombre de nœuds opérationnels après 5000 fois de simulation, qui est illustré comme suit :

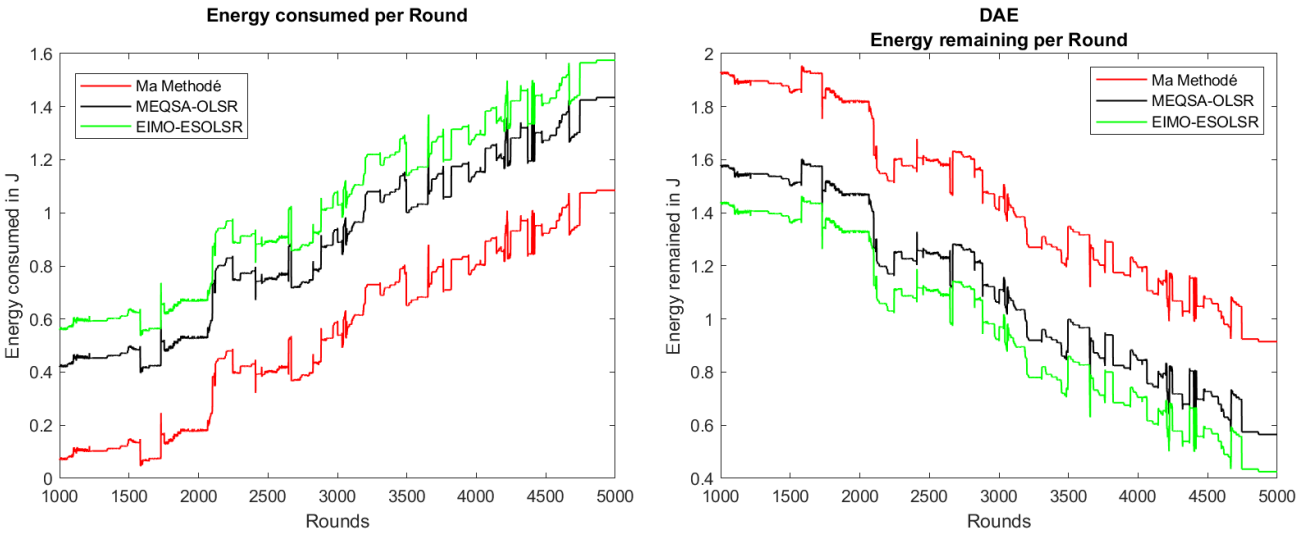
1) Notre méthode : $\frac{36\times100}{120} = 30\%$
2) MEQSA-OLSRv2 : $\frac{26\times100}{120} = 22\%$
3) EIMO-ESOLSR : $\frac{20\times100}{120} = 17\%$

En plus une analyse comparative de nœuds désactivés ou morts après 5000 fois de simulation entre cette méthode et les autres méthodes à savoir EIMO-OLSR et MEQSA-OLSRv2, sera alors :

1) Notre méthode : $\frac{84\times100}{120} = 70\%$
2) MEQSA-OLSRv2 : $\frac{94\times100}{120} = 78\%$
3) EIMO-ESOLSR : $\frac{99\times100}{120} = 83\%$

VII.5.3. Energie consommée

Les figures suivantes montrent les chronogrammes d'énergies consommées, d'énergies résiduelles et de la moyenne d'énergies consommées selon cette solution proposée. On remarque que cette solution optimise bien le problème d'économies énergétiques dans les réseaux de capteurs sans fils mobiles et améliore la qualité de services réseaux.



a. Energies consommées b. Energies restantes

Figure 20. Energie consommée et restante

Cette figure [Fig 20.a] montre un gain d'énergies consommées après 5000 fois de simulation sur chaque méthode simulée comme illustre dans la section suivante :

1) Notre méthode : $\frac{1.08\times100}{2} = 54\%$
2) MEQSA-OLSRv2 : $\frac{1.42\times100}{2} = 71\%$
3) EIMO-ESOLSR : $\frac{1.58\times100}{2} = 79\%$

En plus, le gain d'énergies résiduelles après 5000 fois de simulation sur chaque méthode simulée, était illustré comme suit compte tenu de la figure ci- après [Fig 20.b] :

1) Notre méthode : $\frac{0.92\times100}{2} = 46\%$
2) MEQSA-OLSRv2 : $\frac{0.58\times100}{2} = 29\%$
3) EIMO-ESOLSR : $\frac{0.42\times100}{2} = 21\%$

Connaissant que l'énergie consommée est inversement proportionnelle au nombre de nœuds opérationnels. Plus le nombre de nœuds opérationnels diminue, plus l'énergie consommé augmente. Ce qui sera le même cas sur l'énergie restante car sa diminution est causée par l'augmentation de nœuds perdus ou désactivés dans une topologie réseau.

Conclusion sur ce chapitre

D'après les résultats obtenus après la simulation de cette solution proposée, on peut admettre que cette méthode est plus performante que les autres déjà analysées car le cumule de la durée de vie du réseau a un gain d'amélioration de 8% et celui de l'économie énergétique est de 17% en comparaison avec d'autres méthodes comme MEQSA-OLSRv2 et EIMO-ESOLSR par exemple.

En plus de cela, on a réduit considérablement la probabilité d'un mauvais comportement au sein des nœuds MPR avec un cumule de 10%, ce qui a augmenté également la qualité de services à 85% comme taux de livraison de données ou paquets (PDR) car il y a moins de données supprimées par les nœuds MPR comparativement aux autres solutions proposées.

Cette amélioration considérable observée dans cette solution a été dite suite à la combinaison de deux algorithmes des solutions analysées plus performantes que les autres, qui sont entre autres MEQSA-OLSRv2 et EIMO-ESOLSR. On a en plus intégré aussi dans cette combinaison d'algorithmes un mécanisme d'agrégation de données au sein des nœuds MPR. Ce qui a diminué le nombre de fois de transfert de paquets entre les nœuds MPR et la station de base ou point de collecte pendant la phase de mise à jours des données dans un serveur.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail intitule "**Optimisation de la consommation d'énergie avec OLSR dans des réseaux de capteurs sans fil**" a porté sur l'étude de la gestion d'énergie dans les réseaux des capteurs sans fil dans le but d'étendre la durée de vie du réseau et d'améliorer la qualité de services réseau lors du traitement de données, de l'émission, de la réception et du transfert des données captées par ces derniers.

Ce projet a pour objectif d'étudier, d'élaborer et d'implémenter un mécanisme à l'aide d'un protocole OLSR permettant d'optimiser la consommation d'énergie dans des réseaux de capteurs sans fil et mobile en définissant des règles prenant en compte toutes les métriques définissant le rythme de la consommation énergétique, durant le processus de choix des nœuds responsables MPR dans le but d'éviter l'élection des nœuds à faible énergie entant que des MPR car ces derniers consomment beaucoup d'énergie par rapport aux autres nœuds non-MPR. Ce mécanisme consiste à éviter le processus de réélire à chaque fois les nouveaux nœuds MPR à cause de ses batteries qui tendent à s'épuiser, ce qui provoque aussi plus d'inondations dans le réseau, causées par la diffusion énorme des messages de control lors de la découverte des routes.

En plus de ce mécanisme d'élection des nœuds MPR, ce travail a mobilisé aussi l'optimisation d'énergies durant les phases de réception et de transfert les données des nœuds voisins, reçues par un nœud MPR. Ce qui nous a permis de définir un mécanisme d'agrégation de données au sein des nœuds MPR dans le but d'extraire les doublons dans les données à transférer et d'économiser l'énergie consommée en transférant séparément les données envoyées par chacun de nœuds couverts par un nœud MPR.

Pour arriver aux résultats de ces objectifs ci-hauts définis, on a proposé un algorithme d'optimisation d'énergie et le diagramme des processus d'agrégation de données comprenant les paramètres nécessaires à ce travail. A l'aide du logiciel de modélisation mathématique appelé MATLAB, on a fait une simulation de cet algorithme suivant son diagramme et on a trouvé des bons résultats avec un gain de 8% sur la durée de vie et 17% en économies énergétiques.

Mais lors de l'agrégation des données, on n'a pas pu arriver à simuler le processus définissant les conditions relatives aux données d'urgence qui devraient être transférées vers la station de base ou le point de collecte de données sans être agrégées avec d'autres données non urgentes. Ceci pourra faire l'objet pour le futur projet de recherche afin de bien étendre l'économie d'énergies et l'amélioration de la qualité de services dans les réseaux MANET/WSN.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]. M. Conti and S. Giordano, ''Multihop ad hoc networking: The evolutionary path,'' *in Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions, vol. 35. Hoboken, NJ, USA: Wiley*, 2013, p. 3, doi: 10.1002/9781118511305.ch1.

[2]. P. Bellavista, G. Cardone, A. Corradi, and L. Foschini, ''Convergence of MANET and WSN in IoT urban scenarios,'' *IEEE Sensors J., vol. 13, no. 10*, pp. 3558–3567, Oct. 2013.

[3]. M.-S. Pan and S.-W. Yang, ''A lightweight and distributed geographic multicast routing protocol for IoT applications,'' *Comput. Netw., vol. 112*, pp. 95–107, Jan. 2017.

[4]. D.B. Johnson, D.A. Maltz and J. Broch, "DSR: The Dynamic Source Routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks," *Ad Hoc Networking, Chapter 5, edited by C.E. Perkins, Addison-Wesley*, pp. 139-172, 2001.

[5]. R. Malekian, A. Karadimce and A. H. Abdullah, "AODV and OLSR routing protocols in MANET," in Proc. of IEEE Thirty-third International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, pp. 286-289, 8-11 July 2013. Article (CrossRef Link).

[6]. T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," RFC Editor, 2003.

[7]. T. Clausen, C. Dearlove, P. Jacquet and U. Herberg, "Optimized Link State Routing Protocol version 2," Internet Engineering Task Force (IETF) RFC 7181, April 2014.

[8]. H. JMEL - M. CAUDRON - A. BRISSET - P. M. GUITARD, Réseaux de capteurs sans-fils, projet avancé, Université de Lyon, 2008.

[9]. https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/ad-hoc-wireless-network.

[10]. https://www.greeksforgreeks.org/introduction-of-mobile-ad-hoc-network-manet/

[11]. https://www.memoireonline.com/01/09/1878/les-technologies-sans-fils-le-routage-dans-les-réseaux-ad-hoc-olsr-et-aodv5.html, Fatima AMEZA.

[12]. Kirti Aniruddha Adoni and Radhika D. Joshi "Optimization of Energy Consumption for OLSR Routing Protocol in MANET", *in International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN) Vol. 4, No. 1, February 2012.*

[13]. T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," *in Internet Request For Comments RFC 3626, Internet Engineering Task Force, October 2003.*

[14]. A. Qayyum, L. Viennot, and A. Laouiti, "Multipoint relaying for flooding broadcast messages in mobile wireless networks," in *Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2002. HICSS, 2002, pp. 3866– 3875.*

[15]. S. MOAD, La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans-fil, Etude bibliographique, IFSIC-Rennes 1, 2007/2008.

[16]. Ian F. Akyildiz Series in Communications and Networking: Akyildiz and Wang**:** Wireless Mesh Networks**,** 978-0470-03256-5, January 2009, Akyildiz and Vuran**:** Wireless Sensor Networks**,** 978-0470-03601-3, August 2010**,** Ekic**i:** Mobile Ad Hoc Networks**,** 978-0470-68193-0 (forthcoming, 2011)

[17]. Crossbow MicaZ mote specifications. *http://www.xbow.com.*

[18]. Mts420 environment sensor board. *Available at http://www.xbow.com*.

[19]. R. H. Walden. Analog-to-digital converter survey and analysis. *IEEE Journal of Selected Areas in Communication,* 17(4):539–550, April 1999.

[20]. A. Sinha and A. Chandrakasan. "Dynamic power management in wireless sensor networks". *IEEE Design and Test of Computers***,** 18(2):62–74, 2001.

[21]. A. Wang and A. Chandrakasan. "Energy-efficient DSPs for wireless sensor networks". *IEEE Signal Processing Magazine***,** 43(5):68–78, July 2002.

[22]. A. Y. Wang and C. G. Sodini. "A simple energy model for wireless microsensor transceivers". *In Proceedings of IEEE Globecom'04***,** pp. 3205–3209, Dallas, TX, USA, November 2004.

[23]. Nabil Ghanem and Habiba Belleili, "Energy Consumption Balancing in OLSR Ad Hoc Wireless Routing Protocol", in *An International Journal Applied Mathematics & Information Sciences*

[24]. Simulator, E. N. (2012). "Scalable Network Technologies"**.** Inc**.[**Online**].** *Available: http://web.scalable-networks.com/content/exata*

[25]. Rong, P., & Pedram, M. (2006). "An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries". *Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions*

[26]. Yao, Y., Cao, Q., & Vasilakos, A. V. EDAL: "An Energy-Efficient, Delay-Aware, and Lifetime-Balancing Data Collection Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Networks".

[27]. De Rango, F., Fotino, M., & Marano, S. (2008). « EE-OLSR: Energy efficient OLSR routing protocol for mobile ad-hoc networks". *(pp. 1–7). IEEE*

[28]. Waheb A. Jabbar, Wasan Kadhim Saad, Et Mahamod Ismail "MEQSA-OLSRv2: A Multicriteria-Based Hybrid Multipath Protocol for Energy-Efficient and QoS-Aware Data Routing in MANET-WSN Convergence Scenarios of IoT", presented at IEEE access, Malaysia, Nov. 2018

[29]. Waheb A. Jabbar , Mahamod Ismail, Rosdiadee Nordin "Multi-criteria based multipath OLSR for battery and queue-aware routing in multi-hop ad hoc wireless networks ", published on *Springer Science+Business Media New York , Nov. 2014 and Wireless Networks, vol. 21, pp. 1309-1326,2015*

[30]. A. K. Jaiswal and S. Tiwari, "Modified OLSR (MOLSR) Protocol for improving optimal route selection with Dynamic MPR selection in Mobile Adhoc Network," ***IJSRSET,*** *vol. 1, 2015.*

[31]. A. Sahnoun, **et al.**, "EEPR-OLSR: An Energy Efficient and Path Reliability Protocol for Proactive Mobile Ad-hoc Network Routing**,"** *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS),*
vol. 9, 2017.

[32]. S. Prajapati, **et al.**, "Optimizing Performance of OLSR Protocol Using Energy Based MPR Selection in MANET**,"** *2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies***,** 2015

[33]. Mohit and S. Pal, "Stable MPR Selection in OLSR for Mobile Ad-Hoc Networks," *(IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies***,** vol. 6, pp. 5121-5125, 2015.

[34]. S. M. Chauhan and A. M. Lathigara, "Energy Efficient Multipath OLSR in Mobile Adhoc Networks," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, vol. 03, 2016.***

[35]. Safaa Laqtib and Khalid El Yassini, "A New Energy Efficient Mechanism to Enhance MPR Selection in OLSR: EEM-OLSR", *published on Proceedings of the 4th European International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Rome, Italy, August 2-5, 2021*

[36]. Belkheir Mohammed and Bouziani Merahi, "LE-OLSR protocol performance evaluation in various energy conditions of mobile Ad-hoc and sensor wireless networks", published on: *https://www.researchgate.net/publication/340808387*

[37]. F. De Rango, M. Fotino, and S. Marano, ''EE-OLSR: Energy efficient OLSR routing protocol for mobile ad-hoc networks,'' in *Proc. IEEE Mil. Commun. Conf. (MILCOM)***,** Nov. 2008, pp. 1–7

[38]. L. Fatima and E. Najib, "Energy and mobility in OLSR routing protocol**,"** Cyber *Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, (JSAT),* 2012.

[39]. Najib EL KAMOUN, "Energy and Mobility in OLSR routing protocol", published on **:** *https://www.researchgate.net/publication/271705700*

[40]. Anjali Anand, Rinkle Rani and Himanshu Aggarwal, "Energy Efficient and Secure Multipoint Relay Selection in Mobile Ad hoc Networks", published at KSII Transactions On Internet And Information Systems Vol. 10, No. 4, Apr. 2016

[41]. Hamela Kanagasundaram1and A. Kathirvel "EIMO-ESOLSR: energy efficient and securitybased model for OLSR routing protocol in mobile ad-hoc network", published at IET, Jan. 2019

[42]. Waheb A. Jabbar, M. Ismail, and Rosdiadee Nordin, "MBA-OLSR: A Multipath Battery Aware Routing Protocol for MANETs", in *2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*

[43]. W. A. Jabbar, M. Ismail, R. Nordin, and R. M. Ramli, ''EMA-MPR: Energy and mobility-aware multi-point relay selection mechanism for multipath OLSRv2,'' *presented at the IEEE 13th Malaysia Int. Conf. Commun. (MICC), Johor Bahru, Malaysia, Nov. 2017*

[44]. A. Mehmood and H. Song, "Smart Energy Efficient Hierarchical Data Gathering Protocols for Wireless Sensor Networks**,"** *Smart Computing Review*, vol. 5, no. 5, pp.425-462, October 2015. Article (CrossRef Link).

[45]. Sofiane Hamrioui , Mustapha Lalam and Pascal Lorenz **"**A new approach for energy efficiency in MANET based on the OLSR protocol**",** ***in*** *International Journal of Wireless and Mobile Computing · July 2012.*

[46]. A. Sheth and R. Han , "Adaptive power control and selective radio activation for low-power infrastructure-mode 802.11 LANS," *in Proc. of the Twenty Third International Conference on Distributed Computing Systems*, pp. 812-818, 19-22 May 2003. Article (CrossRef Link**).**

[47]. Q. Wang, M. Hempstead and W. Yang, "A Realistic Power Consumption Model for Wireless Sensor Network Devices*," in Proc. of Third Annual IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, SECON 2006*, pp. 286-295, 28 September 2006. Article (CrossRef Link)

[48]. F. De Rango, M. Fotino and S. Marano, "EE-OLSR: Energy Efficient OLSR routing protocol for Mobile ad-hoc Networks*," in Proc. of IEEE Military Communications Conference, MILCOM 2008, pp. 1-7*, 16-19 November 2008. Article (CrossRef Link).

[49]. W.K. Hirata, Y. Higami and S.Y. Kobayashi, "Residual energy-based OLSR in mobile ad hoc networks," *in Proc. of International Conference on Multimedia Technology (ICMT), pp. 3214-3217*, 26-28 July 2011. Article (CrossRef Link).

[50]. A. Kots and M. Kumar, "The fuzzy based QMPR selection for OLSR routing protocol," *Wireless Networks. vol. 20, no. 1, pp. 1-10*, January 2014. Article (CrossRef Link).

[51]. R. B. Patil and A.B. Patil, "Energy, Link Stability and Queue Aware OLSR for Mobile Ad Hoc Networks," *in Proc. of International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics*, pp. 1020-1025, 10-13 August 2015. Article (CrossRef Link).

[52]. W. A. Jabbar, M. Ismail and R. Nordin, "Multi-criteria based multipath OLSR for battery and queue-aware routing in multi-hop ad hoc wireless networks," *Wireless Networks, vol. 21, no. 4, pp. 1309-1326*, May 2015. Article (CrossRef Link).