



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCCEN

THÈSE LMD

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT

Spécialité: *Réseaux et Systèmes Distribués*

Par :

CHIKH Asma

Sur le thème

Routage multi-chemin dans les réseaux de capteurs multimédias sans fil

Soutenue publiquement le 10 Juillet 2021 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr BENMAMMAR Badr	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr LEHSAINI Mohamed	Professeur	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
Mr BOUKLI HACENE Sofiane	Professeur	Université de Sidi Bel Abbes	Examineur
Mr MERAD BOUDIA Omar Rafik	MCA	Université d'Oran 1	Examineur
Mr HADJILA Mourad	MCA	Université de Tlemcen	Examineur

*Laboratoire Systèmes et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC)
BP 119, 13000 Tlemcen - Algérie*

Remerciements

Je tiens, avant toute chose, à remercier ALLAH TOUT PUISSANT de m'avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience afin de réaliser ce travail de thèse.

J'exprime ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Mr LEHSAINI Mohamed pour son esprit scientifique, sa pédagogie, sa disponibilité, sa patience, ses conseils et ses idées qui m'ont permis de mener à bien cette thèse.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à Mr BENMAMMAR Badr de me faire l'honneur de s'intéresser à ce travail et d'avoir présidé le jury

J'exprime ensuite ma plus profonde gratitude à Mr BOUKLI HACENE Sofiane, Mr MERAD BOUDIA Omar Rafik et Mr HADJILA Mourad qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être les rapporteurs de cette thèse.

Mes grands remerciements à Mr François SPIES pour son soutien et son aide durant mes séjours de stage à l'université de Franche-Comté (France).

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire Systèmes et Technologie de l'Information et de la Communication (STIC) de l'université de Tlemcen. Je souhaite également remercier les membres de ce laboratoire. A commencer par les responsables de ce laboratoire Mr LEHSAINI et Mr FEHAM de m'avoir accueilli au sein de ce laboratoire pour leurs disponibilités, précieux conseils et gentillesse. A Mme BELHADI Sihem pour son amitié, son aide, son encouragement et ses conseils. Enfin, à tous mes collègues du laboratoire à qui je souhaite beaucoup d'épanouissement dans leurs travaux.

Enfin, J'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui me sont très chères qui m'ont encouragé, soutenu durant toutes ces années, en commençant par ma famille : d'abord ma pensée va également vers mes très chers parents pour tous leurs sacrifices pour nous depuis toujours et pour m'avoir soutenu et encouragé dans mon choix de poursuites d'étude. Ma très chère sœur et mes très chers frères pour leurs accompagnements et encouragements, ma famille maternelle et paternelle et ma belle-famille.

A titre plus personnel, Je remercie chaleureusement mon très chers époux Imad, pour sa patience, son encouragement, ses conseils et surtout pour son soutien moral.

A vous tous, Merci !

Dédicaces

Je dédie ce travail

A la mémoire de ma grand-mère

A mes très chers parents

A ma très chère sœur et mes très chers frères

A mon très cher époux

Je dédie ce travail avec reconnaissance et amour

Asma

Table des matières

Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iii
Introduction Générale	1
1 Les réseaux de capteurs multimédias sans fil : Généralités et Concepts	6
1.1 Introduction	6
1.2 Capteur multimédia	7
1.2.1 Définition	7
1.2.2 Composition	7
1.2.3 Caractéristiques	8
1.2.4 Différentes plateformes	9
1.3 Réseaux de Capteurs Multimédias Sans Fil (RCMSFs)	10
1.3.1 Définition	10
1.3.2 Architecture	11
1.3.3 Caractéristiques des RCMSFs	12
1.3.4 Domaines d'applications	13
1.3.5 Modèles de communication	14
1.3.6 Modèle de surveillance	15
1.3.7 Consommation d'énergie	17
1.3.8 Exigences de qualité de service	18
1.3.9 Technologies sans fil pour les RCMSFs	19
1.3.10 Les principaux défis des RCMSFs	21
1.4 Comparaison entre les RCSFs et les RCMSFs	23
1.5 Routage dans les RCMSFs	23
1.5.1 Structure du réseau	24
1.5.2 Techniques de routage	26
1.5.3 Paradigme du routage multi-chemin	27
a) Avantages du routage multi-chemin	28
b) Types de multi-chemin	29
1.5.4 Routage géographique	31
1.6 Conclusion	33
2 État de l'art sur le routage multi-chemin dans les réseaux de capteurs multimédias sans fil	34
2.1 Introduction	34
2.2 Classification des protocoles de routage multi-chemin dans les RCMSFs	35

2.2.1	Équilibrage de charge	35
a)	Le protocole TinyONDMR	36
b)	Le protocole LBHR	37
c)	Le protocole de Xie et al.	38
d)	Le protocole AGEM	39
e)	Le protocole GEAM	40
2.2.2	Agrégation de bande passante	41
a)	Le protocole DGR	41
b)	Le protocole MR2	42
c)	Le protocole BP-CMPR	42
2.2.3	Efficacité énergétique	42
a)	Le protocole REAR	43
b)	Le protocole de routage multi-chemin à efficacité énergétique	43
c)	Le protocole PEMuR	43
d)	Le protocole LEAR	44
e)	Le protocole EA-TPGF	44
f)	Le protocole MPRM	44
2.2.4	Réduction de délai	45
a)	Le protocole DCHT	45
b)	Le protocole AMPMCR	45
2.2.5	Fiabilité de données	46
a)	Le protocole MHDmWTS	46
b)	Le protocole QMOR	47
2.3	Récapitulatif sur les protocoles de routage multi-chemin conçus pour les RCMSFs	47
2.4	Classification des protocoles de routage géographique multi-chemin dans les RCMSFs	49
2.5	Conclusion	57
3	Routage géographique multi-chemin à nœuds-disjoints pour les RCMSFs	58
3.1	Introduction	58
3.2	Contexte	59
3.3	Contribution 1 : le protocole MMGPSR	60
3.3.1	Travaux connexes	60
3.3.2	Fonctionnement du protocole MMGPSR	60
3.3.3	Evaluation des performances	62
a)	Environnement de travail	63
b)	Résultats de simulation	64
3.4	Contribution 2 : le protocole TLQM-AGEM	66
3.4.1	Estimation de la qualité du lien	67
3.4.2	Sélection de voisins	68
3.4.3	Fonction du coût de routage	68
3.4.4	Sélection des chemins	69
3.4.5	Fonctionnement de TLQM-AGEM	70
3.4.6	Evaluation des performances	71
a)	Environnement de travail	72

b)	Résultats de simulation	72
3.5	Conclusion	75
4	Routage multi-chemin basé sur la transmission gloutonne dans les RCMSFs	76
4.1	Introduction	76
4.2	Contribution 1 : Le protocole LQLB-MGR	76
4.2.1	Contexte	76
4.2.2	Travaux connexes	77
4.2.3	Hypothèses	79
4.2.4	Modèle d'énergie radio	79
4.2.5	Le protocole LQLB-MGR	79
a)	Découverte des chemins à nœuds-disjoints	79
b)	Équilibrage de charge (calcul des coûts des chemins)	81
c)	Étapes du protocole LQLB-MGR	82
4.2.6	Evaluation des performances	83
a)	Environnement de travail	83
b)	Résultats de simulation	83
4.3	Contribution 2 : le protocole GCGM	87
4.3.1	Contexte	87
4.3.2	Hypothèses	88
4.3.3	Division des données multimédias	88
4.3.4	Le protocole GCGM	88
a)	Découverte des chemins disjoints	89
b)	Contournement des trous	92
c)	Algorithme GCGM	92
4.3.5	Evaluation des performances	94
a)	Environnement de travail	94
b)	Résultats de simulation	95
4.4	Conclusion	102
	Conclusion Générale	103
	Bibliographie	107

Liste des figures

1.1	Exemples de capteurs scalaires [1]	7
1.2	Anatomie d'un capteur	8
1.3	Paramètres de configuration d'un capteur directionnel (α : Angle avec la verticale, θ : ouverture de la caméra, R_s : Rayon de détection) [2]	9
1.4	Exemples de capteurs multimédias [3]	10
1.5	Exemple d'un RCMSF	11
1.6	Architectures typiques d'un RCMSF [4]	12
1.7	Pile protocolaire d'un RCMSF	15
1.8	Surveillance périodique	16
1.9	Surveillance à la demande	16
1.10	Surveillance événementielle	17
1.11	Modèle radio de consommation d'énergie [5]	18
1.12	Topologie plate	25
1.13	Topologie hiérarchique	26
1.14	Routage multi-chemin	27
1.15	Chemins non-disjoints	30
1.16	Chemins à nœuds-disjoints	30
1.17	Chemins à liens-disjoints	31
1.18	Chemins partiellement disjoints	31
1.19	Chemins totalement disjoints	31
1.20	Différentes stratégies de "Greedy forwarding"	33
2.1	Protocoles de routage multi-chemin dans les RCMSFs	36
2.2	Routage source [6]	36
2.3	Propagation des messages RREQ ayant le plus petit nombre de sauts [6]	37
2.4	Propagation des messages RREQ sans chevauchement [6]	38
2.5	Commutation des deux modes de routage dans AGEM [7,8]	39
2.6	Adaptation de l'angle de vue [7]	40
2.7	Routage en marche arrière [7]	41
2.8	Protocoles de routage géographique multi-chemin dans les RCMSFs	49
3.1	Routage glouton	61
3.2	Présence d'un trou (vide)	62
3.3	Transmission de périmètre	62
3.4	Nombre de paquets reçus vs taille du réseau	65
3.5	Taux de paquets perdus vs taille du réseau	65
3.6	Énergie consommée vs taille du réseau	66
3.7	Latence vs taille du réseau	66

3.8	Routage d'un paquet d'un flux inconnu [7]	70
3.9	Routage d'un paquet d'un flux connu [7]	70
3.10	Taux moyen de paquets délivrés à la station de base	73
3.11	Taux moyen de perte de paquets	73
3.12	Délai moyen de bout en bout	74
3.13	Énergie résiduelle moyenne	74
4.1	Nombre moyen de paquets perdus	84
4.2	Taux moyen de paquets délivrés à la station de base	85
4.3	Nombre moyen de sauts	86
4.4	Durée de vie moyenne du réseau	86
4.5	Délai moyen de bout en bout	87
4.6	Division des données multimédias	89
4.7	Exemple de plusieurs chemins à nœuds-disjoints	89
4.8	Format du paquet PROB	90
4.9	Distance et direction du prochain saut (le nœud candidat) vers la station de base	91
4.10	Format du paquet INFO	91
4.11	Nœud bloqué et situation de blocage	92
4.12	Organigramme du protocole de routage GCGM	93
4.13	Nombre de nœuds morts	96
4.14	Nombre de paquets reçus par la BS	96
4.15	Taux de paquets délivrés (PDR)	97
4.16	Nombre moyen de sauts	98
4.17	Taux de perte de paquets	98
4.18	Énergie résiduelle moyenne	99
4.19	Délai moyen de bout en bout	100
4.20	Durée de vie du réseau	101
4.21	PSNR vs nombre de nœuds	102

Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques fondamentales de quelques capteurs multimédias [3]	10
1.2	Comparaison entre les RCMSFs et les RCSFs [9]	24
2.1	Récapitulatif sur les protocoles de routage multi-chemin conçus pour les RCMSFs	48
2.2	Récapitulatif sur les protocoles de routage géographique et multi-chemin dans les RCMSFs	55
3.1	Paramètres de simulation (MMGPSR)	64
3.2	Paramètres de simulation (TLQM-AGEM)	72
4.1	Paramètres de simulation (LQLB-MGR)	83
4.2	Paramètres de simulation (GCGM)	94

Glossaire

- AAEEGF** Application Aware Energy Efficient Geographic Greedy Forwarding. 50, 60
- ABC** Artificial Bee Colony. 78
- ABC-EELB-PWDGR** Artificial Bee Colony Based EELB-PWDGR protocol. 52, 78
- ADCs** Analog to Digital Converters. 7
- AGEM** Adaptive Greedy-compass Energy-aware Multipath protocol. 3, 4, 39, 59, 78
- AMPMCR** Adaptive Multi-Constraint Multipath Routing protocol. 45
- AODV** Ad hoc On Demand Distance Vector protocol. 44
- BP-CMPR** Bandwidth-Power aware Cooperative Multi-Path Routing protocol. 42
- CCD** Charge Coupled Device. 9
- CH** Cluster Head. 11, 25
- CMOS** Complementary Metal-Oxide Semi Conductor. 6
- CSA-MGR** Carrier Sense Aware Multipath Geographic Routing protocol. 53
- DCHT** Delay-Constrained High Throughput protocol for multipath transmission. 45
- DGR** Directional Geographical Routing protocol. 41, 51, 60
- E-AGEM** Energy-Efficient and QoS-Aware Multipath Geographic Routing protocol. 53, 78
- E-DGR** Enhanced Directional Geographical Routing protocol. 51, 60
- EA-TPGF** Energy-Aware TPGF. 44, 50, 60
- EABC-EELB-PWDGR** Enhanced ABC based EELB-PWDGR protocol. 52, 78
- EAR** Energy-Aware Routing protocol. 42
- EBMR** an Energy Balancing Multipath Routing protocol. 77
- EE-PWDGR** Energy Enhanced Pair-Wise Directional Geographical Routing protocol. 52, 77

- EELB-PWDGR** Energy Enhanced Load Balancing PWDGR protocol. 52, 77
- EEMGR** Energy and ETX aware Multipath Geographic Routing protocol. 51, 79
- EQGOR** Efficient QoS-aware Geographic Opportunistic Routing protocol. 60
- ETX** Expected Transmission Count. 3, 51, 80
- FoV** Field of Vision. 9
- GCGM** Greedy Compass Geographic Multipath routing protocol. 5, 76, 87, 88, 104
- GEAM** Geographic Energy-Aware non-interfering Multipath protocol. 40, 51
- GEAMS** Geographic Energy-Aware Multipath Stream-based routing protocol. 5, 53, 60, 78
- GMRP** Geographic Multipath Routing Protocol. 77
- GPS** Global Positioning System. 8, 79
- GPSR** Greedy Perimeter Stateless Routing protocol. 3, 4, 49, 59
- HNP** Hidden Node Problem. 51
- ISM** Industrial, Scientific and Medical. 21
- LBHR** Load Balancing-based Hierarchical Routing protocol. 37
- LEAR** Load-based Energy Aware multimedia Routing protocol. 44
- LQEAR** Link Quality and Energy-Aware Routing protocol. 51, 78
- LQI** Link Quality Indicator. 3, 4, 51, 53, 67, 78
- LQLB-MGR** Link Quality and Load Balancing Multipath Geographic Routing protocol. 5, 76, 77, 104
- MEMS** Micro-Electro Mechanical Systems. 6
- MHDMwTS** Minimum Hop Disjoint Multipath routing algorithm with Time Slice load balancing congestion control scheme. 46
- MMGPSR** Modified Multipath GPSR protocol. 4, 59, 60, 104
- MMRE-AOMDV** Maximal Minimal Residual Energy-AOMDV. 81
- MPMPS** Multi-Priority Multi-Path Selection. 50
- MPRM** Multipath Routing Method for Supporting QoS and Improving Energy Efficiency in WMSNs. 44

- MR2** Maximally Radio-disjoint Multipath Routing protocol. 42
- MSE** Mean Squared Error. 101
- NIMGR** Non-Interfering Multipath Geographic Routing protocol. 53
- NS** Neighbor Set. 68
- OSI** Open Systems Interconnection. 15
- PDR** Packet Delivery Ratio. 72, 83
- PEMuR** Power Efficient Multimedia Routing. 43
- POWQR** Power-aware QoS Routing for WMSNs. 60
- PRR** Packet Reception Ratio. 3, 4, 53, 67
- PSNR** Peak Signal to Noise Ratio. 94
- PWDGR** Pair-Wise Directional Geographical Routing protocol. 51, 60
- QMOR** QoS-aware Multi-sink Opportunistic Routing protocol. 47
- QoS** Qualité of Service. 1, 18
- RCMSFs** Réseaux de Capteurs Multimédias Sans Fil. 1, 6, 10
- RCSF** Réseau de Capteurs Sans Fil. 1, 6
- REAR** Real time Energy Aware Routing protocol. 43
- RREP** ROUTE REPLY. 36
- RREQ** ROUTE REQUEST. 36
- RSSI** Received Signal Strength Indicator. 43, 67
- RTS/CTS** Request-To-Send/Clear-To-Send. 51
- SMR** Split Multipath Routing protocol. 36
- SNR** Signal-to-Noise Ratio. 3, 4, 53, 67
- TIGMR** Triangle link quality metric and minimum inter-path Interference based Geographic Multipath Routing protocol. 51, 78
- TinyONDMR** Optimised Node-Disjoint Multipath Routing protocol. 36
- TLQM-AGEM** AGEM-based Multipath routing protocol using Triangle Link Quality. 4, 53, 59, 104

TPGF Two-Phase Geographical greedy Forwarding protocol. 44, 50, 60

UWB Ultra-WideBand. 20

WMSNs Wireless Multimedia Sensor Networks. 1, 6, 10

WSN Wireless Sensor Network. 1, 6

Résumé

Le routage géographique multi-chemin est une stratégie efficace pour transmettre les flux de données dans les réseaux de capteurs multimédias sans fil (RCMSFs) puisqu'il permet de répondre aux exigences en termes de qualité de service (QoS) dans ce type de réseaux.

La première partie de cette thèse propose deux états de l'art sur les solutions de routage multi-chemin proposées dans la littérature pour les RCMSFs. Dans un premier temps, on a proposé une nouvelle classification de ces protocoles en se basant sur l'objectif du routage. Deuxièmement, on a classé les solutions de routage géographique multi-chemin selon les solutions originales et leurs dérivées. La deuxième partie de cette thèse consiste à améliorer, développer et concevoir de nouvelles solutions de routage géographique multi-chemin dans les RCMSFs. Le premier protocole proposé est une version multi-chemin du protocole GPSR appelé MMGPSR. Ensuite, nous avons conçu une extension du protocole AGEM où une métrique triangulaire de qualité de lien est ajoutée pour sélectionner le prochain saut, appelé TLQM-AGEM. Troisièmement, un nouveau protocole de routage géographique multi-chemin a été proposé, appelé LQLB-MGR. Cette solution de routage consiste en deux phases. La première est destinée à la construction de l'ensemble des chemins tandis que la deuxième sert à équilibrer la charge entre les chemins sélectionnés pendant la première phase. Enfin, un autre nouveau protocole géographique multi-chemin (GCGM) a été proposé. Ce protocole est basé sur une approche gloutonne.

Les résultats des simulations ont illustré les atouts de nos solutions de routage proposées en termes de plusieurs critères de performance tels que, la durée de vie du réseau, le taux de livraison des paquets (PDR) et la consommation d'énergie.

Mots-clés: RCMSFs, Routage multi-chemin, Routage géographique, Routage glouton, Exigences de QoS, Disjonction de chemins.

Abstract

Multipath geographic routing is an effective strategy for transmitting data flows in wireless multimedia sensor networks (WMSNs) since it enables to meet the Quality of Service (QoS) requirements in this type of networks.

The first part of this thesis proposes two states of the art concerning multipath routing solutions developed in the literature for WMSNs. First, a new classification of these protocols was proposed based on the purpose of routing. Second, the multipath geographic routing solutions have been classified according to the original solutions and their derivatives. The second part of this thesis consists to improve, develop and design new multipath geographic routing solutions in WMSNs. The first protocol proposed is a multi-path version of the GPSR protocol called MMGPSR. Next, we designed an AGEM protocol extension where a triangular link quality metric is added to select the next hop called TLQM-AGEM. Third, a new multipath geographic routing protocol is proposed, called LQLB-MGR, this routing solution consists of two phases where the first is intended for building the set of paths while the second is for load balancing between the paths selected during the first phase. Finally, another new multi-path geographic protocol is proposed based on the two greedy routing approaches called GCGM, this protocol also proposed weighted constants for all metrics used for the selection of paths.

The simulation results illustrated the benefits of our routing solutions in terms of several performance criteria such as the network lifetime, the packet delivery rate (PDR) and the power consumption.

Keywords: WMSNs, Multipath routing, Geographic routing, Greedy routing, QoS requirements, Path disjunction.

ملخص

يعد التوجيه الجغرافي متعدد المسارات إستراتيجية فعالة لإرسال تدفقات البيانات في شبكات استشعار الوسائط المتعددة اللاسلكية حيث يمكن أن يوفر متطلبات جودة الخدمة.

يقترح الجزء الأول من هذه الأطروحة حالتين من الفن فيما يتعلق بحلول التوجيه متعدد المسارات التي تم تطويرها في الأدبيات المخصصة لـ RCMSFs. أولاً، تم اقتراح تصنيف جديد لهذه البروتوكولات بناءً على الغرض من التوجيه. ثانياً، تم تصنيف حلول التوجيه الجغرافي متعدد المسارات وفقاً للحلول الأصلية ومشتقاتها. يتكون الجزء الثاني من هذه الرسالة من تحسين، تطوير وتصميم حلول توجيه جغرافي متعددة المسارات في RCMSFs. البروتوكول الأول المقترح هو إصدار متعدد المسارات من بروتوكول GPSR يسمى MMGPSR. بعد ذلك، قمنا بتصميم ملحق بروتوكول AGEM حيث تمت إضافة مقياس جودة الارتباط الثلاثي لتحديد القفزة التالية، المسمى TLQM- AGEM. ثالثاً، تم اقتراح بروتوكول توجيه جغرافي جديد متعدد المسارات، يسمى LQLB-MGR، يتكون حل التوجيه هذا من مرحلتين حيث تهدف الأولى إلى بناء مجموعة من المسارات بينما تقوم الثانية بموازنة الحمل بين المسارات المحددة في المرحلة الأولى. أخيراً، تم اقتراح بروتوكول جغرافي جديد متعدد المسارات بناءً على نهج التوجيه الجشع يسمى GCGM، كما اقترح هذا البروتوكول أيضاً ثوابت مرجحة لجميع المقاييس المستخدمة لاختيار المسارات.

أوضحت نتائج المحاكاة فوائد حلول التوجيه الخاصة بنا من حيث العديد من معايير الأداء مثل عمر الشبكة ومعدل تسليم الحزم (PDR) واستهلاك الطاقة.

الكلمات المفتاحية: شبكات استشعار الوسائط المتعددة اللاسلكية، التوجيه متعدد المسارات، التوجيه الجغرافي، التوجيه الجشع، متطلبات جودة الخدمة، فصل المسار.

Introduction Générale

Introduction Générale

Contexte

Les rapides évolutions technologiques dans divers domaines incluant la micro-électronique, la mécanique et la communication sans fil ont permis la création de minuscules appareils électroniques peu coûteux appelés capteurs. Chaque nœud capteur est doté d'un micro-processeur, d'un microcontrôleur, d'une batterie et d'au moins d'un capteur ce qui le rend muni de capacités de calcul, de stockage et de communication. Néanmoins, les nœuds capteurs sont assujettis à de sévères restrictions notamment celles liées au stockage, aux ressources de traitement, aux capacités de communication et en particulier aux limitations d'énergie. Le déploiement d'un certain nombre de nœuds capteurs dans une zone d'intérêt forme ce qu'on appelle un "Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF)" connu par "Wireless Sensor Network (WSN)", qui est une sous classe des réseaux ad hoc. Un RCSF a comme rôle principal la transmission des données collectées vers un nœud spécifique appelé puits ou station de base ou bien sink. Le développement des RCSFs a été initialement motivé par le secteur militaire. Cependant, leurs performances admirables en plusieurs termes tels que le faible coût et la fiabilité ont leurs permis d'être largement utilisés dans les secteurs civils comme l'environnement, l'agriculture, le transport, le commerce, l'industrie, la santé, la domotique, etc.

Les progrès dans la nanotechnologie ont introduit des dispositifs de détection contemporains capables de capturer des données multimédias sous forme d'audio, d'images, et de vidéos [10]. Ces dispositifs sont peu coûteux, plus autonomes, plus miniaturisés, plus intelligents, plus puissants et plus distribués ce qui les rendent plus omniprésents dans notre vie quotidienne à mesure que leur demande augmente. L'apparition de ces dispositifs a conduit à la naissance des Réseaux de Capteurs Multimédias Sans Fil (RCMSFs) connu sous le nom de "Wireless Multimedia Sensor Networks (WMSNs)", un type bien particulier des réseaux de capteurs sans fil (RCSFs). Cette nouvelle génération de RCSFs est capable de traiter, stocker, agréger et communiquer de flux multimédias collectés par diverses sources hétérogènes. Les RCMSFs permettent l'amélioration des applications existantes dans les RCSFs traditionnels grâce à la perception plus spécifique des phénomènes dans les régions critiques, sensibles, et/ou hostiles et apportent aussi un nouveau champ d'applications innovantes comme la surveillance vidéo, le suivi d'objets, gestion de crises, ville intelligente, etc. Ce type d'applications véhiculent des données multimédias massives (conséquentes) qui exigent un traitement intense et un taux de transmission plus élevé par rapport aux applications scalaires ce qui implique une demande élevée d'énergie. Cependant, la transmission de flux multimédias volumineux dans les RCMSFs pose de grands défis, notamment en termes de garanties de qualité de service "Qualité of Service (QoS)" et d'efficacité énergétique [11].

Les noeuds capteurs sont caractérisés par des ressources limitées en termes d'espace mémoire et de puissance énergétique puisqu'ils sont alimentés par de simples piles ou batteries difficiles à recharger ou bien remplacer. L'efficacité énergétique reste un enjeu majeur dans les RCMSFs car elle affecte la durée de vie des réseaux. Les protocoles de routage dans les RCMSFs doivent viser à minimiser l'énergie consommée en réduisant la quantité de données transmises dans le réseau puisque les communications et surtout les transmissions sont les plus gourmandes en consommation d'énergie. En plus, les noeuds capteurs doivent généralement transmettre les données collectées d' selon un schéma de routage multi-sauts pour garantir la connectivité du réseau. La communication multi-sauts entre une paire de noeuds distants voulant échanger des paquets de données doit impliquer plusieurs noeuds intermédiaires (relais). Ces noeuds capteurs intermédiaires acheminent les données du noeud source vers le noeud puits.

Par ailleurs, les protocoles de routage conçus initialement pour les RCMSFs ne peuvent pas répondre à ces exigences, en particulier ceux impliquant un seul chemin dans le processus de transmission de données. Ces derniers présentent plusieurs limitations où le plus influant figure dans la répartition de charge déséquilibrée dans le réseau ce qui diminue la durée de vie de ce dernier. Par conséquent, la technique de routage à chemin unique ne peut pas être considérée comme une solution de routage robuste pour répondre aux exigences de diverses applications. A cet effet, les protocoles de routage multi-chemin sont considérés comme des solutions appropriées pour atteindre les objectifs de routage souhaités car ils peuvent réduire d'une manière efficace la consommation d'énergie, la latence et la collision de paquets, et peuvent aussi réaliser l'équilibrage de charge ce qui implique la prolongation de la durée de vie du réseau. Les protocoles de routage multi-chemin construisent et maintiennent plusieurs chemins entre une paire de noeuds (noeud source et noeud destination) afin de distribuer le trafic entre ces chemins multiples ce qui conduit à l'amélioration des performances et l'agrégation des ressources disponibles.

En outre, le routage géographique est considéré comme une technique de routage multi-chemin très efficace pour les RCMSFs puisqu'il permet une transmission efficace des flux multimédias. Ce schéma de routage transmet les paquets d'un noeud source au noeud puits (station de base) en fonction de la localisation géographique du noeud source, de ses voisins et celle du noeud puits ce qui élimine le besoin de stocker et de partager les informations de la topologie totale du réseau (stocker uniquement les informations sur le voisinage à un saut). Ceci réduit le coût de partage d'informations et diminue la possibilité d'utiliser des informations obsolètes dans une décision de routage. De plus, cette approche de routage ne nécessite pas les liaisons de bout en bout car elle prend les décisions de routage saut par saut. Par conséquent, elle élimine l'utilisation des messages de demande de chemin coûteux. La transmission gloutonne est la stratégie de transmission la plus utilisée dans cette approche où le prochain saut est sélectionné en fonction des informations locales concernant chaque voisin à un saut.

Contribution

La présente thèse propose de nouvelles approches permettant de router les données multimédias pour répondre aux exigences de la QoS et l'efficacité énergétique. Ainsi, les contributions proposées dans le cadre de cette thèse peuvent être résumées comme suit :

- La première contribution proposée est une version améliorée du protocole "Greedy Perimeter Stateless Routing protocol (GPSR)", appelée MMGPSR où le schéma de routage est multi-chemin et à nœuds-disjoints. Ce schéma de routage applique les deux algorithmes utilisés dans la version originale pour la sélection de chemins multiples : l'algorithme glouton et l'algorithme de périmètre. Dans l'algorithme glouton, le nœud voisin le plus proche de la station de base et qui n'appartient à aucun autre chemin est choisi comme prochain saut. Dans le cas où aucun nœud ne répond à ces deux contraintes ou des déconnexions se produisent dans le réseau générant ce que nous appelons "zone vide" à cause de défaillance de certains nœuds, de déploiement aléatoire des nœuds ou de la présence d'obstacles, l'algorithme de périmètre est utilisé pour contourner cette zone de routage vide.
- La deuxième contribution est basée sur le schéma de routage géographique "Adaptive Greedy-compass Energy-aware Multipath protocol (AGEM)" auquel la métrique triangulaire de qualité de lien a été ajoutée dans la fonction coût pour choisir le prochain saut. Cette métrique implique trois paramètres de qualité de lien : "Link Quality Indicator (LQI)", "Signal-to-Noise Ratio (SNR)" et "Packet Reception Ratio (PRR)". La valeur LQI présente l'indicateur de qualité de lien, la valeur SNR est la différence en décibels entre la force du signal reçu et le bruit, et la valeur PRR est le rapport des paquets reçus au nœud puits et le nombre total de paquets transmis par le nœud source pendant une durée prédéfinie. L'objectif de cette solution est de choisir des chemins avec des liaisons de communication fiables afin de garantir la transmission fiable de flux de données.
- La troisième contribution est une nouvelle solution de routage géographique multi-chemin permettant de construire des chemins avec des liens de communication de bonne qualité et d'équilibrer la charge entre l'ensemble des nœuds du réseau ce qui prolonge sa durée de vie. Ce schéma de routage est exécuté en deux phases. La première phase sert à sélectionner les chemins multiples en se basant sur trois critères : la distance entre les voisins à un saut, l'énergie restante des capteurs et la métrique de qualité de lien "Expected Transmission Count (ETX)". La deuxième phase permet d'équilibrer la charge entre les chemins construits durant la première phase en tenant compte de l'énergie résiduelle nodale.
- La quatrième contribution est dédiée au routage géographique multi-chemin. Elle combine deux approches gloutonnes pour construire l'ensemble des chemins entre un nœud source et la station de base : routage glouton basé sur la distance (distance-based) et routage glouton basé sur la direction (direction-based). Cette solution de routage implique trois paramètres pour choisir le meilleur prochain saut : la distance des voisins à un saut avec la destination, la direction des nœuds voisins vers le nœud puits et l'énergie restante des nœuds. Elle propose également des constantes pondérées de toutes ces métriques utilisées pour chaque nœud.

Organisation de la thèse

Cette thèse est organisée en quatre chapitres comme suit :

- Le premier chapitre dresse le contexte des RCMSFs où nous présentons au premier lieu l'élément de base de ce type de réseaux qui est le capteur multimédia : sa définition, sa composition, ses caractéristiques et ses différentes plateformes. Ensuite, nous présentons les RCMSFs et leurs différents aspects, à savoir : leurs architectures, leurs différentes caractéristiques et leurs domaines d'application. Par la suite, nous mettons l'accent sur le modèle de communication dans les RCMSFs, le modèle de surveillance et la consommation d'énergie dans ce type de réseaux. Les sections qui suivent sont destinées aux exigences de la qualité de service dans les RCMSFs, les technologies sans fil utilisées dans ce type de réseaux, et les principaux défis des RCMSFs. Finalement, nous étudions le routage dans cette famille de réseaux.
- Le deuxième chapitre est une étude bibliographique sur les solutions de routage multi-chemins dans les RCMSFs. Dans ce chapitre, deux états de l'art ont été proposés. Le premier état de l'art est une classification des différentes solutions de routage multi-chemin proposées dans la littérature pour les RCMSFs. Cette classification est basée sur l'objectif du routage. Un tableau comparatif de ces solutions de routage est proposé pour mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chaque solution. Le deuxième état de l'art est une classification qui concerne les protocoles de routage géographique multi-chemin dans les RCMSFs. Cette classification est suivie d'une comparaison détaillée entre ces différents protocoles de routage géographique en mettant en évidence plusieurs critères pour ressortir les limitations et les avantages pour chaque protocole de routage. Cette synthèse approfondie nous a permis de tracer les différentes motivations pour le développement de nouvelles solutions de routage multi-chemin destinées aux RCMSFs.
- Le troisième chapitre décrit nos deux premières solutions de routage géographique multi-chemin pour les RCMSFs : "Modified Multipath GPSR protocol (MMGPSR)" et "AGEM-based Multipath routing protocol using Triangle Link Quality (TLQM-AGEM)". Le schéma de routage MMGPSR est une version multi-chemin et à nœuds-disjoints du schéma de routage géographique "GPSR". Ce schéma de routage exécute les mêmes algorithmes utilisés par la version originale pour la construction de l'ensemble des chemins : l'algorithme glouton et l'algorithme de périmètre. L'algorithme glouton sélectionne comme prochain saut le voisin le plus proche de la station de base et qui n'appartient à aucun autre chemin. Dans le cas où cet algorithme ne parvient pas à trouver un tel nœud qui répond à ces deux critères (le nœud courant est en face d'une zone vide) l'algorithme de périmètre est utilisé pour surpasser cette zone de routage vide. Cette solution a été évaluée et comparée à d'autres solutions de routage selon plusieurs critères de performances. Le schéma de routage TLQM-AGEM est une version améliorée du schéma de routage géographique multi-chemin "AGEM" auquel une métrique triangulaire de qualité de lien a été ajoutée dans la fonction coût pour sélectionner le prochain saut. Les trois paramètres de qualité de lien impliqués dans cette métrique sont : l'indicateur de qualité de lien "LQI", la valeur "SNR" qui présente la différence en décibels entre la force du signal reçu et le bruit et la valeur "PRR" qui est le rapport des paquets reçus au nœud puits et le nombre total de paquets transmis par le nœud source pendant une durée prédéfinie. L'objectif de cette solution est de choisir des chemins avec les liens de communication les plus fiables afin de garantir la fiabilité de routage des flux de données.

Une évaluation des performances du schéma de routage TLQM-AGEM a été réalisée pour illustrer ses bénéfices par rapport aux protocoles AGEM et "Geographic Energy-Aware Multipath Stream-based routing protocol (GEAMS)".

- Le quatrième chapitre présente deux solutions de routage géographique multi-chemin pour les RCMSFs : "Link Quality and Load Balancing Multipath Geographic Routing protocol (LQLB-MGR)" et "Greedy Compass Geographic Multipath routing protocol (GCGM)". Le schéma de routage LQLB-MGR s'exécute en deux phases. La première détermine l'ensemble des chemins entre un noeud source et la station de base et la deuxième phase permet d'équilibrer la charge entre les chemins trouvés au cours de la première phase afin d'augmenter la durée de vie du réseau. Cette solution a été évaluée et comparée à d'autres solutions de routage selon plusieurs critères de performances. Le schéma de routage GCGM est basé sur les deux stratégies gloutonnes de routage (distance-based et direction-based) ou une approche hybride est exécutée durant la phase de construction des chemins selon la topologie du réseau. En outre, cette solution de routage implique des poids pondérés pour chaque approche et pour chaque nœud. Une évaluation des performances du schéma de routage GCGM a été réalisée pour illustrer ses bénéfices par rapport à d'autres solutions de routage décrites dans la littérature.

Ce manuscrit est clôturé par une conclusion générale qui rappelle les différentes contributions élaborées dans le cadre de ce travail de recherche et présente quelques perspectives pour les futurs travaux de recherche.

Chapitre 1

Les réseaux de capteurs multimédias sans fil : Généralités et Concepts

Chapitre 1

Les réseaux de capteurs multimédias sans fil : Généralités et Concepts

1.1 Introduction

Les progrès technologiques récents dans les systèmes microélectroniques appelés Micro-Electro Mechanical Systems (MEMS), les communications sans fil et les systèmes intégrés, ont permis la naissance de dispositifs miniaturisés peu coûteux, de puissance limitée pouvant communiquer entre eux, appelés capteurs. Ces dispositifs ont des capacités de détection, de stockage, de calcul, de traitement et de communication. L'utilisation de ces nœuds capteurs dans les systèmes qui exigent des informations de l'environnement externe est devenue indispensable afin d'évaluer et agir au temps opportun. Par conséquent, une connaissance complète et précise de cet environnement nécessite le déploiement d'un nombre suffisant de capteurs formant une infrastructure appelé "RCSF" référée par "WSN". La figure 1.1 illustre des exemples de capteurs scalaires.

Un RCSF est un type particulier de réseaux Ad hoc, un système dynamique et autonome constitué de capteurs fixes ou mobiles reliés entre eux par des liaisons sans fil sans aucune infrastructure ni de gestion centrale. La tâche principale d'un RCSF est de collecter des informations scalaires de phénomènes physiques (pression, température, humidité, lumière, etc.) ou bien physiologiques (tension, glycémie, etc.), et de les transmettre au nœud puits (station de base) directement ou à travers une architecture multi-sauts. La station de base communique ces informations à un centre de contrôle via un satellite ou via internet afin de les analyser. Les RCSFs sont largement utilisés dans divers domaines, on peut citer la santé, la domotique, l'environnemental, le militaire, l'industrie, etc [12].

L'émergence de tout petit matériel multimédia à bas prix tels que les microphones MEMS et les caméras "Complementary Metal-Oxide Semi Conductor (CMOS)" ont conduit à une nouvelle famille de réseaux appelée les "RCMSFs" connue en anglais par "WMSNs". Ce nouveau type de réseaux ouvre de nouveaux horizons pour une large gamme d'applications qui ont des exigences supplémentaires en termes de qualité de service, consommation d'énergie et latence.

Dans ce chapitre, nous présentons les capteurs multimédias en premier lieu ; ensuite, nous focalisons sur les divers aspects des RCMSFs : allant de la définition à l'architecture, en passant par les caractéristiques et les différents domaines d'application. Les deux sections suivantes mettent en évidence les modèles de communication, les modèles de sur-



FIGURE 1.1 – Exemples de capteurs scalaires [1]

veillance et la consommation d'énergie. Puis, nous présentons les exigences de la qualité de service, les technologies sans fil pour les RCMSFs ainsi que les principaux défis des RCMSFs. Enfin, nous mettons l'accent sur la spécificité du routage dans les RCMSFs.

1.2 Capteur multimédia

1.2.1 Définition

Les récents avancés technologiques et la disponibilité d'équipements comme les microphones et les caméras ont permis la transition d'un modèle de capteur traditionnel dédié uniquement à la collecte de données scalaires (simples) vers un nouveau modèle de capteurs capable de collecter des flux multimédias (audio, image et vidéo). Il existe plusieurs exemples de ce nouveau modèle, on peut citer : Stargate et Cyclope.

1.2.2 Composition

Un nœud capteur multimédia est constitué généralement de quatre modules ou unités fondamentales [12] comme c'est illustré par la figure 1.2 :

- **Unité de capture (d'acquisition)** : c'est le module principal d'un capteur, généralement constitué de deux sous modules : les capteurs (microphone, caméra, capteur scalaire) et les convertisseurs analogique-numérique "Analog to Digital Converters (ADCs)". Les capteurs servent à produire des signaux analogiques à propos de phénomène physique et les communiquent au convertisseur. Ces signaux seront transformés en signaux numériques par les ADCs et envoyés vers l'unité de traitement.
- **Unité de traitement** : cette unité représente l'unité centrale d'un capteur ; elle comporte un microcontrôleur (mémoire) et un processeur. Elle est responsable de conserver et de traiter (agrégation, filtrage, compression, etc.) les données prélevées

et aussi contrôler les procédures de communications permettant la collaboration de nœuds avec d'autres nœuds. Ce module a deux interfaces : la première pour recevoir les données captées par l'unité d'acquisition et la deuxième pour transmettre les données traitées vers le module de communication. Des mécanismes servant le partage de charge de traitement entre capteurs participants sont proposés dans la littérature [4].

- **Unité de communication** : elle permet toutes les transmissions des informations entre les divers nœuds capteurs du réseau par le biais d'un émetteur/récepteur via un moyen de communication sans fil. Cette unité consomme la plus grande quantité d'énergie et dispose de quatre modes de fonctionnement [13] : émission "Tx", réception "Rx", repos "Idle" et mode sommeil "Sleep". La portée de communication entre les nœuds capteur d'un RCMSF dépend de la technologie sans fil utilisée.
- **Unité d'alimentation** : le module le plus influant d'un capteur puisqu'il représente la source d'énergie qui sert à alimenter les différents modules du capteur. Cette unité correspond habituellement à une pile ou à une batterie.

Un capteur peut être doté d'autres unités supplémentaires selon le besoin de l'application réalisée : un module de localisation "Global Positioning System (GPS)" pour identifier l'emplacement géographique du capteur, un mobilisateur pour permettre le déplacement du nœud, un générateur de puissance (lumière, cellule solaire, etc) et un dispositif de rotation : sert la rotation d'une caméra d'un capteur vidéo.

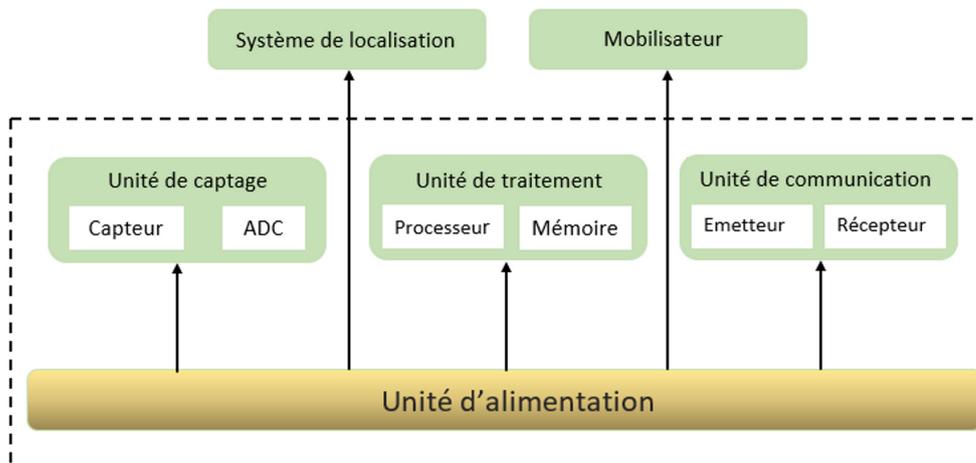


FIGURE 1.2 – Anatomie d'un capteur

1.2.3 Caractéristiques

Equipé d'une caméra intégrée, le capteur multimédia offre une meilleure illustration de phénomènes surveillés et peut stocker, traiter, agréger et corrélérer non seulement de données scalaires mais aussi du contenu multimédia.

Un capteur multimédia et un capteur scalaire se différencient dans plusieurs aspects en particulier le modèle de couverture. Le capteur des mesures scalaires (lumière, température,

pression, humidité, etc.) a un modèle omnidirectionnel tandis que le capteur multimédia suit une perception sectorielle multidimensionnelle lui permettant de collecter une vue d'une zone d'intérêt, appelée généralement le champ de vision "Field of Vision (FoV)" [14]. Ce dernier est caractérisé par divers paramètres incluant : l'ouverture de caméra, l'angle avec la verticale et le rayon de détection de caméra comme il est présenté dans la figure 1.3. Le défi majeur des capteurs multimédias est de trouver une configuration optimale permettant d'étendre la couverture dans le champ d'intérêt en minimisant le nombre de nœuds utilisés.

Les nœuds multimédias sont munis de capteurs CMOS qui ont la capacité de collecter et traiter une image optique par le biais d'une puce intégrée contrairement au modèle traditionnel nommé capteurs "Charge Coupled Device (CCD)" qui exige plusieurs puces. La puce CMOS est composée d'un capteur image, une lentille, un stabilisateur, un compresseur et des algorithmes de traitement des données multimédias. Dans le cas d'une résolution basse et moyenne, la qualité d'image de capteurs CMOS et celle de capteurs CCD sont équivalentes. Les capteurs CMOS sont caractérisés par des caméras plus légères et plus petites, et moins consommatrices en termes d'énergie. Par conséquent, la technologie CMOS est la plus adaptée aux RCMSFs [15].

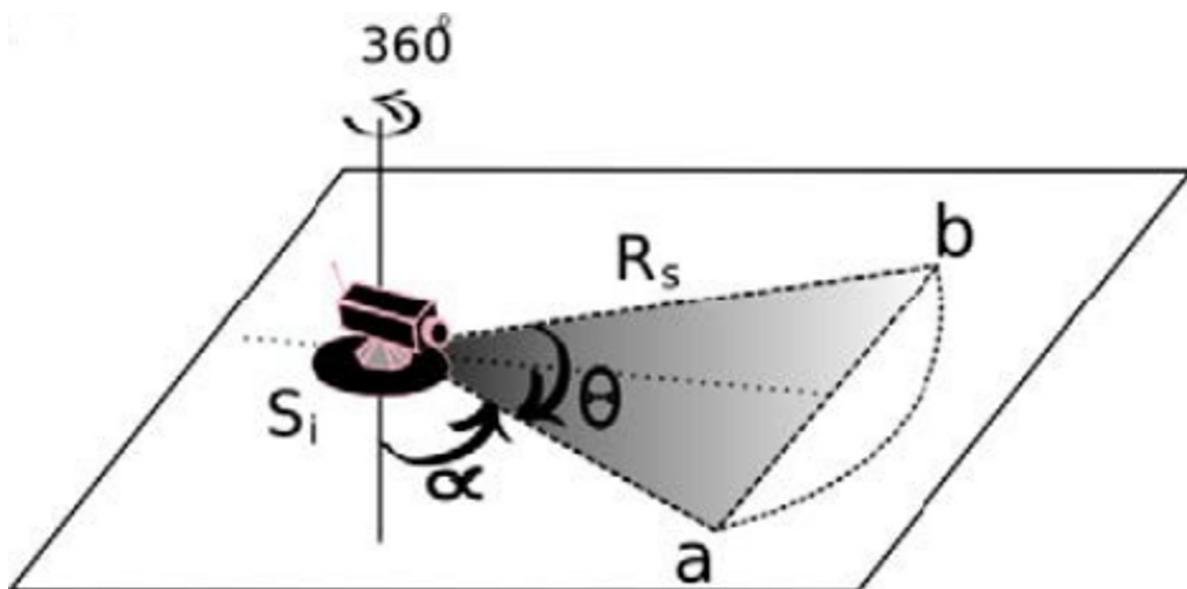


FIGURE 1.3 – Paramètres de configuration d'un capteur directionnel (α : Angle avec la verticale, θ : ouverture de la caméra, R_s : Rayon de détection) [2]

1.2.4 Différentes plateformes

Le tableau 2.1 rapporte les caractéristiques fondamentales de quelques plateformes de capteurs multimédias présentés dans la figure 1.4. Ces dernières ont été utilisées par certains groupes de recherche dans le domaine des RCMSFs. Les travaux réalisés sur ces plateformes ne permettent pas une comparaison objective entre elles car les environnements d'évaluation étaient différents.

TABLE 1.1 – Caractéristiques fondamentales de quelques capteurs multimédias [3]

Capteur	Contrôleur	RAM	Flash	Caméra résolution
Panoptes	Intel XScale PXA255	64 Mo	32 Mo	Logitech 3000 USB Camera (640x480 pixel @_13 fps) (160x120 pixel @_30 fps)
Cyclops	Atmel ATmega128L	64 Ko	512 Ko	Agilent Compact CIF CMOS ADCM-1700 (352x288 pixel @10 fps)
eCAM	OV528 Serial Bridge	4 ko	/	COMedia C328-7640 board caméra OV7640 (640x480 pixel @30 fps)
CITRIC	Intel XScale PXA270	64 Mo	16 Mo	OmniVision OV9655 (1280x1024 pixel @15 fps) (640x480 pixel @30 fps)
DSPCam	ADSP-BF537 Blackfin	32 Mo	4 Mo	OmniVision OV9653 (640x480 @30 fps) (1280x1024 @15 fps)
Waspnote+ video board	Atmega1281	Waspnote + 2 à 32 Go	4 Mo	Camera (640x480) images, (320x240 @7.5, 10 et 15 fps) vidéos

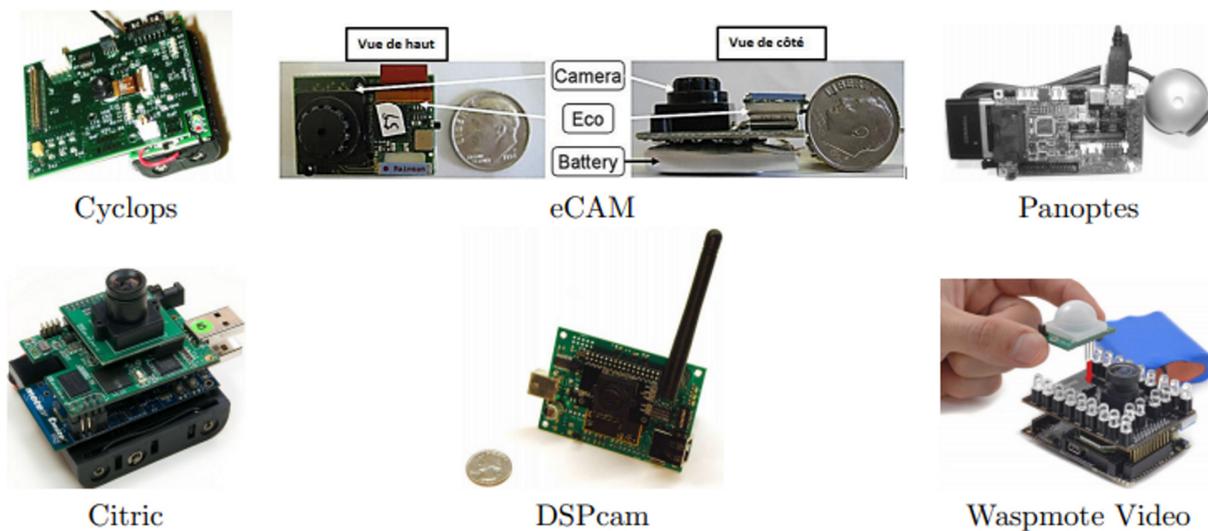


FIGURE 1.4 – Exemples de capteurs multimédias [3]

1.3 Réseaux de Capteurs Multimédias Sans Fil (RCM-SFs)

1.3.1 Définition

Les capteurs multimédias ont conduit à l'émergence d'une nouvelle infrastructure servant la transition de flux multimédia dans les RCM-SFs appelé les "RCMSFs" en anglais "WMSNs", ont comme objectif principal la surveillance de la zone d'intérêt. Un RCMSF est constitué d'un ensemble de capteurs multimédias autonomes. Ces capteurs ont plusieurs tâches : la collecte de contenu multimédia, le traitement sur ce contenu et la transmission de ces informations à la station de base via un support sans fil. Les capteurs

multimédias permettent de collecter une vue directionnelle d'une zone d'intérêt nommée champ de vision et de la communiquer à la station de base. Les données capturées sont traitées localement ou envoyées via un satellite ou internet à un utilisateur distant. La figure 1.5 illustre un exemple d'un RCMSF.

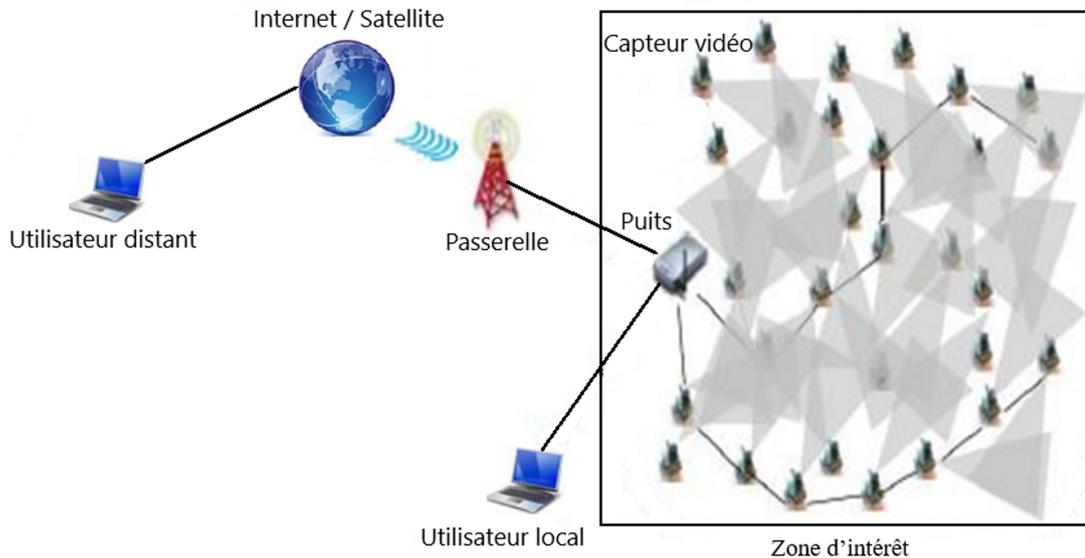


FIGURE 1.5 – Exemple d'un RCMSF

1.3.2 Architecture

Un RCMSF peut utiliser différents types de nœuds capteurs : multimédia ou scalaire, de hautes ou de faibles performances. Ces nœuds hétérogènes, d'autonomies différentes, collaborent entre eux afin d'effectuer des tâches spécifiques dans le champ d'intérêt. Une architecture d'un RCMSF est mise en œuvre en fonction des exigences de l'application utilisée. I. F. Akyildiz et al. [4] proposent une architecture de référence qui représente trois différents types de RCMSFs comme c'est illustré dans la figure 1.6 :

- **Architecture plate à un seul niveau** (la partie (a) dans la figure 1.6) : est composée de deux types de capteurs homogènes : capteurs multimédias et hubs de traitement multimédia. Ces derniers sont capables de traiter, d'agréger, de réduire la taille des données et de les transmettre au nœud puits par le biais d'un plan de communication multi-sauts. Contrairement au stockage qui est centralisé, le traitement dans ce premier type d'architecture est distribué. Le grand avantage de cette architecture est la facilité de gestion.
- **Architecture hiérarchique à un seul niveau** (la partie (b) dans la figure 1.6) : peut utiliser divers types de capteurs hétérogènes (scalaire, audio, vidéo et hub) permettant de former des groupes (clusters). Chaque cluster a un chef "Cluster Head (CH)" responsable de la communication de données vers le nœud puits ou vers les autres CHs. La fusion de tous ces types de nœuds forme une architecture de stockage et traitement centralisée.

- **L'architecture hétérogène multi-niveaux** (la partie (c) dans la figure 1.6) : est constituée de plusieurs couches ; une couche contient des capteurs traditionnels pour collecter des données simples, une autre qui utilise des nœuds multimédias afin d'obtenir de contenu multimédia et une troisième couche où des capteurs multimédias de haute gamme sont déployés permettant d'effectuer les tâches difficiles et communiquer les informations au hub de stockage. Dans ce type d'architecture, le stockage et le traitement de données sont distribués.

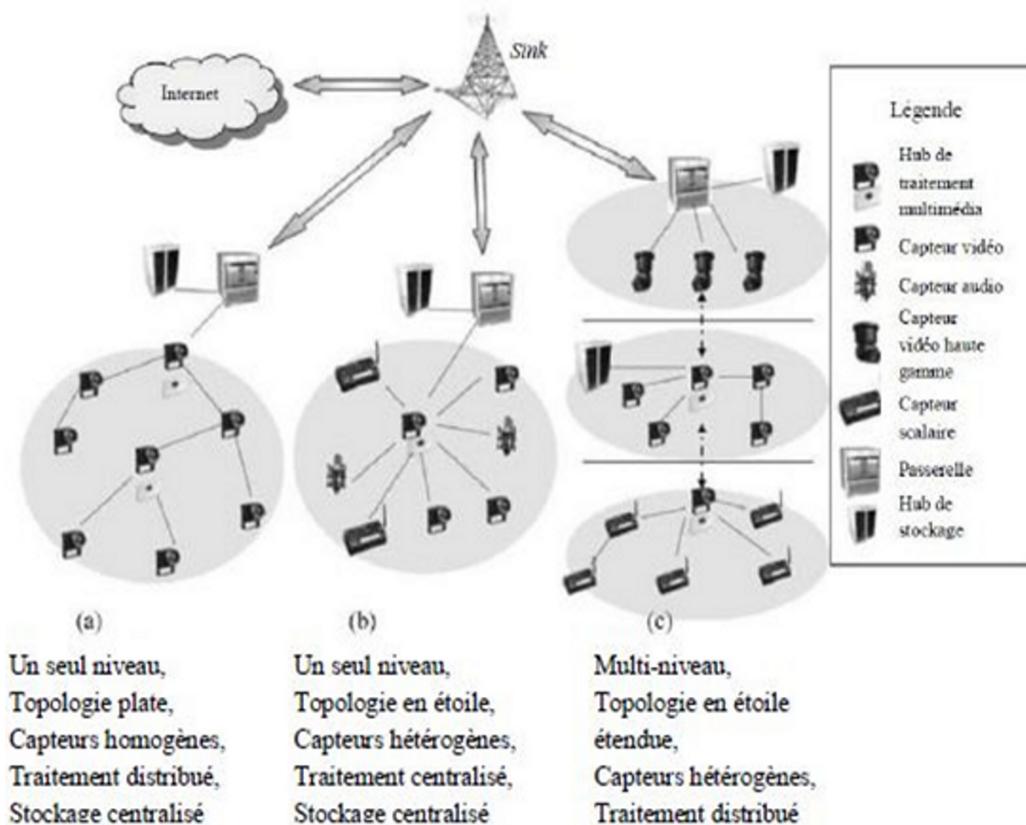


FIGURE 1.6 – Architectures typiques d'un RCMSF [4]

1.3.3 Caractéristiques des RCMSFs

Un RCMSF a plusieurs caractéristiques fondamentales [16], on peut citer :

- **Taille importante** : le nombre de nœuds déployés dans un RCMSF peut atteindre des milliers.
- **Contrainte de calcul, de stockage et d'énergie** : les capteurs sont limités en termes de processeur, mémoire et aussi énergie car généralement sont munis d'une simple batterie. Les données multimédias entraînent un trafic important et cela peut provoquer une forte consommation d'énergie.
- **Auto-organisation** : dans le cas d'un déploiement aléatoire d'un RCMSF et aucune intervention manuelle est possible, le maintien d'une structure efficace est obligatoire pour répondre aux exigences de l'application.

- **Absence d'infrastructure** : les RCMSFs se caractérisent par un nombre de nœuds pouvant atteindre des milliers, il est donc presque impossible d'examiner le fonctionnement de chaque nœud.
- **Topologie dynamique** : le déploiement des capteurs peut être changé soit pour remplacer certains nœuds non opérationnels ou pour étendre le réseau. En outre, la possibilité d'intégrer les capteurs dans des objets en mouvement rend la topologie du réseau en constante évolution.
- **Bande passante limitée** : parmi les caractéristiques de base des réseaux sans fil est le partage de support de transmission cela signifie que la bande passante accordée à un capteur est limitée.
- **Données volumineuses** : les applications multimédias (images, sons ou bien vidéos) sont caractérisées par une grande quantité de données.

1.3.4 Domaines d'applications

L'adaptabilité, la miniaturisation, le faible coût des capteurs, la communication sans fil et aussi l'apparition de réseaux ubiquitaires permettent l'évolution des RCMSFs. Par conséquent, les RCMSFs améliorent non seulement les applications existantes dans les RCSFs mais aussi envahissent de nouveaux domaines d'applications. Ces domaines peuvent être classés en différentes familles :

- **Applications militaires** : comme dans la plupart des technologies, les applications initiales des RCMSFs étaient dans le domaine militaire. Les réseaux de capteurs multimédias peuvent être employés dans ce type d'applications afin de surveiller des champs de batailles à travers la reconnaissance de cibles [17]. Le déploiement des nœuds sur le champ de bataille est soit aléatoire dans les zones difficiles à atteindre ou des points bien définis dans le cas contraire. L'orientation des caméras des capteurs doit être accomplie minutieusement pour couvrir tout le champ observé. Ceci peut causer des problèmes si le mode de déploiement est aléatoire. Beaucoup de projets ont été proposés afin d'aider le domaine militaire et garantir la protection des villes contre les attaques.
- **Applications environnementales** : les capteurs multimédias peuvent être placés dans des grandes régions géographiques pendant de longues durées afin d'obtenir des informations sous formes de vidéos ou images pour analyser le comportement dans l'environnement. Par exemple un RCMSF a été installé dans le parc Ni'iinlii Njike au Canada afin d'étudier le comportement des ours grizzly [18]. De même un autre RCMSF comprend des capteurs Cyclops a été déployé dans la réserve des Montagnes James San Jacinto en Californie pour faire une étude sur la nidification d'une espèce précise d'oiseaux [19].
- **Applications sécuritaires** : les RCMSFs peuvent être servis pour la surveillance des êtres humains ou des lieux publics et privés ou encore être installés pour la surveillance et la protection de frontières terrestres. Ils peuvent aussi être utilisés dans des opérations de recherche et de sauvetage suite à une catastrophe naturelle

comme un séisme par exemple ce qui permet aux services de secours d'intervenir plus rapidement et efficacement.

- **Applications médicales** : les micros capteurs multimédias peuvent être implantés sous la peau ou avalés afin d'obtenir des images en temps réel sur un organe vital dans le corps humain pour surveiller la progression d'une maladie.
- **Applications du trafic routier** : les RCMSFs peuvent aussi collecter des informations sur les véhicules tels que le nombre total des véhicules ayant traversés une certaine route et la vitesse moyenne de ces véhicules et encore capturés et stockés des vidéos ou bien images en cas des accidents. Il existe des systèmes intelligents d'orientation de stationnement basés sur les RCMSFs [20] qui permettent la surveillance et le contrôle des places de stationnement disponibles et la fourniture des orientations de stationnement aux conducteurs afin d'améliorer la mobilité dans les zones urbaines.
- **Applications sportives** : le développement des RCMSFs est de plus en plus employé dans le domaine sportif comme par exemple la détection des erreurs d'arbitrage dans le football.
- **Applications commerciales** : les RCMSFs peuvent être mise en place dans des entreprises pour suivre le procédé de production de matières premières au produit final. Ils peuvent aussi suivre la gestion de livraison et de stockage des produits.
- **Applications domotiques** : les capteurs multimédias embarqués dans les appareils de la maison dite intelligente permettent le contrôle de ces dispositifs soit localement soit à distance et par suite l'enrichissement de ces appareils existants et la suggestion d'un nouvel espace innovant.
- **Application à la robotique** : un robot miniaturisé équipé d'un nœud multimédia peut jouer le rôle de nœud source en capturant des données et en les communiquant vers la destination via d'autres robots déployés dans la région d'intérêt.

1.3.5 Modèles de communication

Ce modèle est implémenté pour construire les protocoles de communication. Cette architecture peut être structurée selon la pile protocolaire traditionnelle ou selon l'approche inter-couches (cross-layer) illustrée dans la figure 1.7. Cette architecture comprend cinq couches et trois plans de gestion :

- **Couche application** : cette couche forme l'ensemble des différentes applications mises en œuvre sur le réseau. Ces dernières doivent fournir des techniques servant l'interaction des utilisateurs avec le RCMSF via diverses interfaces. Cette couche est gérée par l'utilisation directe des logiciels.
- **Couche transport** : elle assure le contrôle de flux, la gestion des erreurs, aussi le découpage, l'ordonnancement et le transport de paquets.

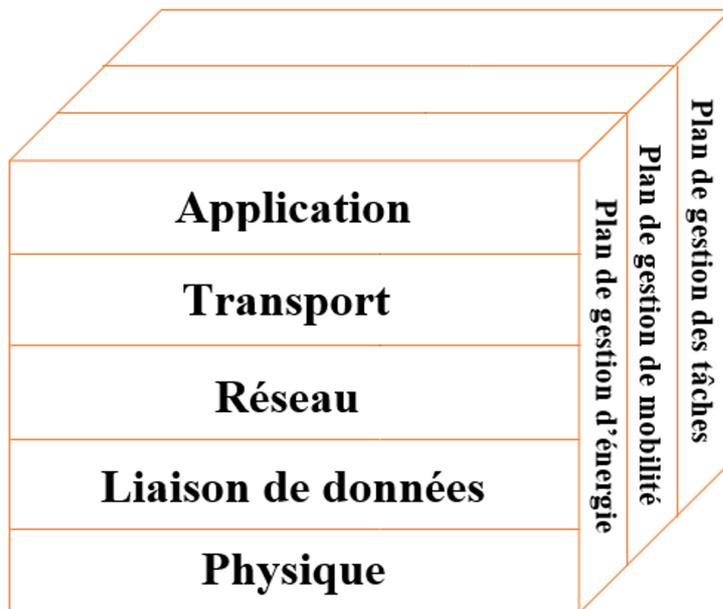


FIGURE 1.7 – Pile protocolaire d'un RCMSF

- **Couche réseau** : elle gère l'acheminement des paquets de données collectées par les capteurs vers le noeud puits avec l'optimisation d'énergie consommée et l'assurance de la QoS exigée par les applications.
- **Couche liaison de données** : cette couche a plusieurs tâches. Elle permet la gestion de l'accès au media de communication, le multiplexage de données et l'assurance d'une connexion fiable entre les nœuds. Elle est également responsable du contrôle et de la correction des erreurs et de la réduction des collisions.
- **Couche physique** : elle a les mêmes fonctions que celle du modèle "Open Systems Interconnection (OSI)", où elle traite toutes les fonctions spécifiques des propriétés matérielles. Ces fonctions comprennent la modulation, le choix des fréquences porteuses, la détection du signal, ainsi que l'injection de données sur le medium de communication.
- **Plan de gestion d'énergie** : ce plan offre des techniques de gestion fiables afin de réduire l'énergie consommée.
- **Plan de gestion de mobilité** : il fournit des mécanismes de contrôle et d'enregistrement des mouvements des nœuds.
- **Plan de gestion de tâches** : il assure une répartition équitable des tâches sur l'ensemble de capteurs du réseau.

1.3.6 Modèle de surveillance

Dans les RCMSFs, il existe quatre différents modèles de surveillance, classifiés comme suit :

1. **Surveillance périodique** : tous les nœuds collectent périodiquement des mesures, et ils communiquent ces mesures au noeuds puits régulièrement comme c'est illustré dans la figure 1.8.

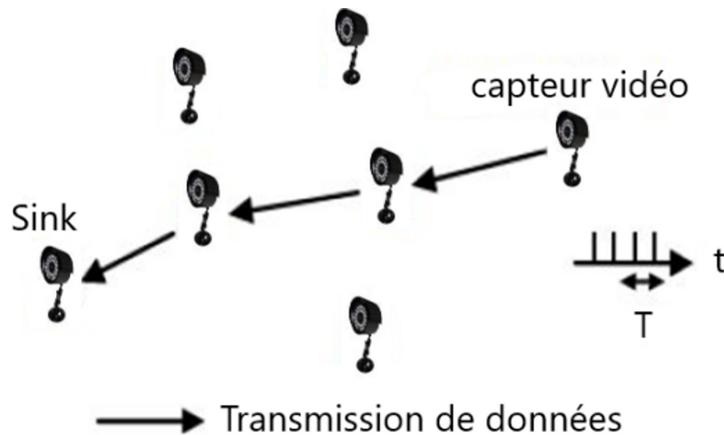


FIGURE 1.8 – Surveillance périodique

2. **Surveillance à la demande** : les capteurs ne déclenchent ni la collecte ni la transmission de données spontanément, ils attendent la réception d'un ordre de la station de base comme il est montré dans la figure 1.9.

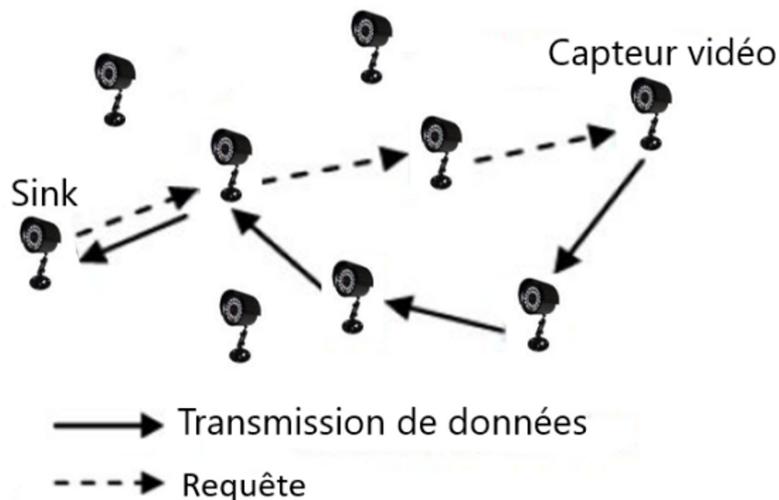


FIGURE 1.9 – Surveillance à la demande

3. **Surveillance événementielle** : dans ce modèle, la communication des données vers le noeud puits aura lieu que si un événement pertinent se produit (1.10). Ce modèle peut être divisé en deux sous modèles en fonction du type d'évènements [21] : à évènements internes quand les évènements sont détectés par le nœud lui-même et à évènements externes quand les évènements sont des messages reçus de la part des autres nœuds (évènements détectés par les autres noeuds).
4. **Surveillance hybride** : toute alliance des trois modèles de surveillance.

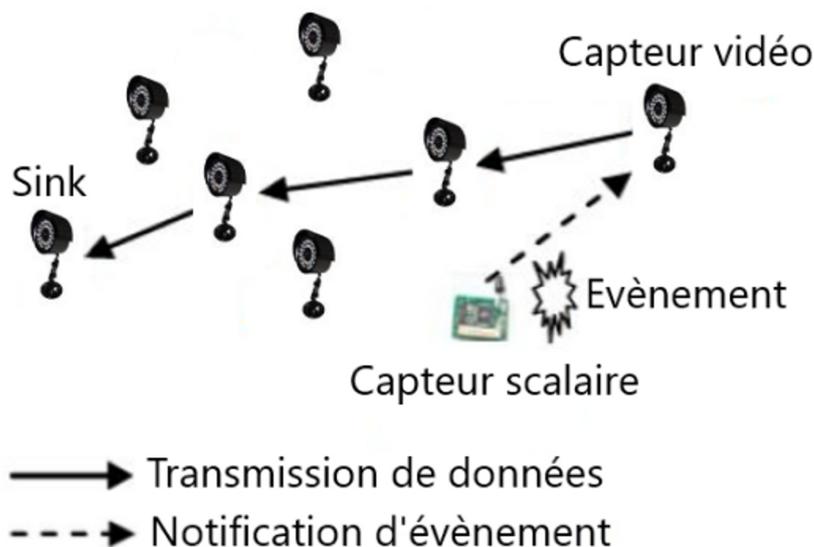


FIGURE 1.10 – Surveillance événementielle

1.3.7 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie au niveau des nœuds est principalement due aux opérations suivantes : l'acquisition, le calcul et la communication de données [22].

1. Énergie d'acquisition

L'énergie d'acquisition est gaspillée pour effectuer les tâches suivantes : traitement du signal, échantillonnage, conversions analogique/numérique. Cette énergie représente un tout petit pourcentage d'énergie totale utilisée par le capteur.

2. Énergie de traitement

L'énergie de calcul est divisée en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. La première partie correspond à la capacité commutée au niveau logiciel et la tension d'alimentation tandis que la deuxième partie représente l'énergie consommée lorsque ce module n'accomplit aucun traitement [23].

3. Énergie de communication

Le module de communication a deux types d'énergie consommée : l'énergie de réception et l'énergie de l'émission. L'énergie utilisée par cette unité dépend de la distance de transmission, la quantité de données à transmettre et les caractéristiques du module radio. Les auteurs dans [5] ont proposé un modèle radio de consommation d'énergie présenté dans la figure 1.11. Ce modèle est généralement le plus utilisé dans les RCSFs et spécialement dans les RCMSFs, où $E_{tx}(n, D)$ et $E_{rx}(n)$ présentent respectivement l'énergie d'émission et l'énergie de réception données par les équations (1.1) et (1.2).

$$E_{tx}(n, D) = n * (E_{elec} + \varepsilon_{amp} * D^2) \quad (1.1)$$

$$E_{rx}(n) = n * E_{elec} \quad (1.2)$$

où :

- n : taille du paquet,
- E_{elec} : énergie de transmission/réception électronique
- E_{amp} : énergie d'amplification
- D : distance entre l'émetteur et le récepteur

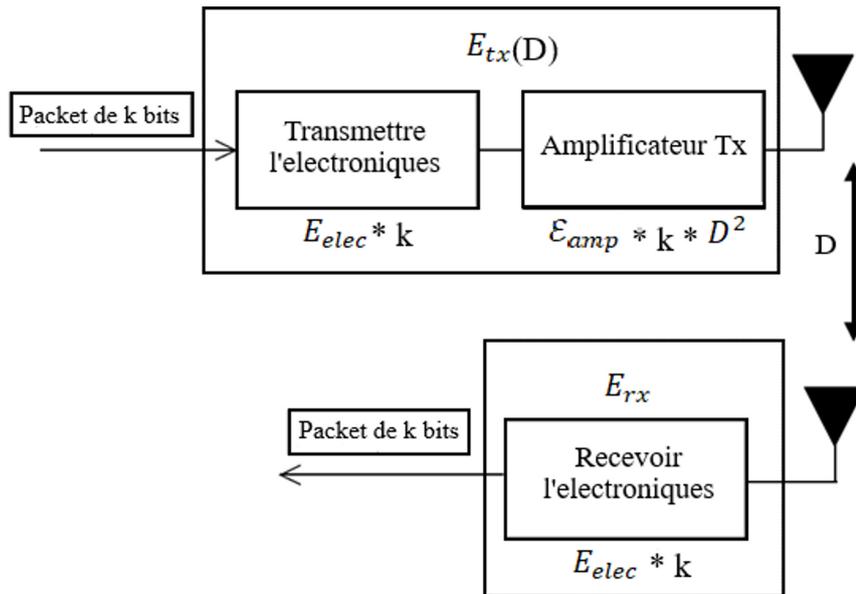


FIGURE 1.11 – Modèle radio de consommation d'énergie [5]

1.3.8 Exigences de qualité de service

La qualité de service "QoS" [24] désigne la capacité d'un réseau à garantir un service conforme à certaines exigences des utilisateurs. Généralement, le concept de QoS implique différents aspects : bande passante, temps de transmission, temps de réponse, consommation d'énergie et sécurité de service. La QoS reflète également l'aptitude du système de communication à fournir les performances requises par l'application telles que le débit, le taux de perte des paquets, et le délai de transmission [25]. Différemment des RCSFs traditionnels qui ont comme objectif principal la maximisation de la durée de vie de réseaux en minimisant la consommation d'énergie, les RCMSFs visent à optimiser la livraison des flux multimédias avec des niveaux de QoS prédéterminés en plusieurs termes tels que : fiabilité, délai, couverture, bande passante et énergie. Ces paramètres doivent être considérés individuellement ou combinés. À cet égard, certains protocoles prennent en charge un seul paramètre et d'autres utilisent deux, trois paramètres ou plus en même temps [26]. Dans ce qui suit, nous présentons les principaux paramètres représentant la qualité de service :

- **Fiabilité** : elle est inversement relatif au taux de perte de paquets, elle représente la capacité de transmission des flux de données du nœud source vers le nœud puits

avec un taux de perte minimal. Atteindre une fiabilité totale est une tâche difficile dans les RCMSFs pour plusieurs raisons comme les caractéristiques du réseau, les liaisons sans fil, les contraintes des nœuds capteurs et les données volumineuses.

- **Latence** : elle représente le temps nécessaire pour transmettre un paquet de données du nœud source au nœud puits, appelée aussi délai ou temps de réponse. Elle dépend essentiellement du temps passé dans le medium et dans les files d'attente. La contrainte de latence est une préoccupation très importante dans les applications multimédias à temps critique où un délai de transmission est imposé.
- **Gigue** : elle s'agit de la variation du délai de transmission de différents paquets de données reçus. Habituellement chaque paquet de données a une exigence de gigue attendue dans le trafic multimédia en temps réel. A cet effet, les streaming vidéos sont généralement les plus exigeants en termes de gigue afin de réduire les distorsions pendant la visualisation ou l'écoute.
- **Bande passante** : appelée aussi débit de transmission ; présente la quantité maximale de données que le réseau peut transmettre pendant une période de temps. Elle dépend de plusieurs paramètres incluant : le nombre de nœuds dans le chemin, le support de la liaison et aussi le type de flux de données. Les flux multimédias demandent une large bande passante en raison de la grande masse de données véhiculées.

En plus des paramètres cités ci-dessus, l'énergie représente également une contrainte stricte de la QoS pour les RCMSFs. En outre, les communications entre les nœuds se font via le canal radio, cependant la qualité de la liaison sans fil reste peu fiable et sujette à des variations dues à l'état du réseau et à sa topologie qui change [15].

Trois niveaux de QoS dans les réseaux de communication ont été proposés dans la littérature [27] :

- **Best-effort service** : fait référence à une connectivité de base sans aucune garantie ni différenciation entre les flux. Ce niveau adopte une approche de maximisation et de minimisation des métriques de QoS.
- **Differentiated service (DiffServ)** : concerne le fait qu'une partie du trafic est mieux gérée que le reste. A cet effet, un mécanisme de priorité du trafic est employé afin de classer le trafic réseau en différentes classes de service, et attribuer à chaque classe un traitement privilégié en fonction de ses besoins [28].
- **Integrated service (IntServ)** : offre des garanties de bout en bout par flux grâce à des techniques de réservation de ressources. Néanmoins, IntServ ne peut pas convenir aux RCSFs puisqu'elle est difficile à développer [29].

1.3.9 Technologies sans fil pour les RCMSFs

La sélection des technologies de communication sans fil a une grande influence sur la conception des RCMSFs et dépend principalement de la finalité de l'application figée. Plusieurs types de technologies sans fil sont supportés par les RCMSFs comme la famille

des normes IEEE 802.11 et celle des normes IEEE 802.15. Chaque type a ses propres caractéristiques dans les aspects suivants : le débit, la portée de communication et l'énergie consommée. Certaines technologies sont normalisées tandis que d'autres sont propriétaires, nous citons dans cette section les plus populaires :

1. **Bluetooth (IEEE 802.15.1)** : Bluetooth a été conçu initialement pour transmettre les données et la voix [30]. Cette technologie propose une topologie qui contient des maîtres et des esclaves avec huit unités actives au maximum. Elle maintient les communications spontanées entre les appareils sans qu'ils aient besoin de se connaître en détail. En raison des coûts de synchronisation élevés, de la consommation d'énergie élevée et de la topologie complexe, Bluetooth est rarement utilisé dans les RCSFs surtout dans les réseaux denses [31].
2. **Wibree (Ultra Low Power Bluetooth)** : c'est une version légère de Bluetooth qui opère dans la bande de fréquences 2.4 GHz. Cette technologie prend en considération une topologie en étoile avec un seul maître et sept esclaves. Elle emploie un débit et une puissance de transmission faibles pour réduire la consommation d'énergie par rapport au Bluetooth. Elle peut comporter un émetteur-récepteur RF commun à Bluetooth. Son inconvénient majeur est présenté par la faible portée de communication (5-10 m).
3. **UWB (IEEE 802.15.3)** : cette technologie emploie des signaux radio envoyés avec des impulsions très courtes et une intensité très faible [32]. Ultra-WideBand (UWB) fonctionne dans la bande de fréquences 3.1-10.6 GHz. Cette technologie est conçue pour remplacer le Bluetooth afin d'offrir plus de bande passante, de réduire la consommation d'énergie, d'atteindre un délai plus court et de minimiser les interférences et. Il existe deux normes de UWB : UWB Forum et WiMedia Alliance. UWB fournit également des services de localisation précise. La limite principale de la technologie UWB est sa faible portée de communication (environ 10 m).
4. **Zigbee (IEEE 802.15.4)** : cette technologie est conçue pour une utilisation dans des communications sur de courtes distances et à très faible puissance. Par rapport à la technologie Bluetooth, Zigbee prévoit une faible latence qui permet aux nœuds capteurs de passer en mode sommeil sans perte de synchronisation. Cette technologie fournit des formes simples d'assurance de QoS. La faible consommation d'énergie et le coût de production très bas rendent le Zigbee un candidat idéal pour la domotique où les équipements de type capteur sont utilisés [33]. Sa limite majeure est le faible débit surtout pour les applications multimédias [4].
5. **WirelessHart [34]** : cette technologie est considérée comme un standard robuste et sécurisé. Elle vise des applications industrielles. Elle définit l'intégralité de la pile protocolaire (de la couche physique jusqu'à la couche application). La couche physique est la même que celle définie dans Zigbee ; elle fonctionne dans la bande 2.4 GHz.
6. **6LoWPAN** : IPv6 over Zigbee, groupe de travail IETF qui considère la communication de paquets IPv6 dans les réseaux personnels sans fil à faible puissance [34]. Ce groupe sert à garantir des implémentations interopérables et à proposer des protocoles de gestion et de sécurité.

7. **Z-wave** : c'est une version légère du Zigbee. Elle fonctionne dans la bande 868/915 MHz. Z-wave considère un nombre de nœuds maximal de 232 et prend en considération les deux topologies : maillée et en étoile. Cependant, cette technologie manque de kits de développement servant de tester les performances [34].
8. **Wi-Fi (IEEE 802.11a/b/g/n)** : est disponible en six catégories : A, B, G, N, AC et AD. La différence entre ces différentes catégories est principalement autour de la portée et du débit maximal. Cette technologie utilise la bande de fréquence "Industrial, Scientific and Medical (ISM)" 2.4 GHz ou la bande 5 GHz. Wi-Fi est caractérisée par un débit élevé allant de 11 Mb/s (IEEE 802.11b) jusqu'à 54 Mb/s (IEEE 802.11a, g). Ce type de technologie est inadapté aux RCSFs à cause de la consommation élevée d'énergie. Cependant, le Wi-Fi est utilisé dans les RCMSFs pour répondre aux exigences de débit élevé imposé par certaines applications.

1.3.10 Les principaux défis des RCMSFs

D'une part les capteurs sont limités en ressources, d'autre part les données multimédias exigent une garantie de la QoS ce qui rend les défis dans les RCMSFs plus complexes que ceux dans les RCSFs traditionnels. En effet, la réalisation de tels réseaux est influencée par différents facteurs dont nous mentionnons les plus marquants :

- **Contraintes de ressources** : les nœuds sont très limités en termes de mémoire, d'énergie, de débit réalisable et aussi de capacité de traitement. Généralement, le changement de batteries des nœuds est impossible ce qui signifie que la durée de vie du réseau dépend fortement de la durée de vie de ces batteries. Par conséquent, la consommation d'énergie dans les RCMSFs est une préoccupation majeure puisque les capteurs multimédias génèrent une quantité importante de données et donc une solution plus coûteuse. Economiser l'énergie d'un RCMSF implique l'économie d'énergie pour chaque nœud et par suite économiser l'utilisation de batterie pour chaque unité qui le compose (unité de captage, de traitement, de communication). Des expérimentations ont illustré que l'énergie consommée par le module de communication peut atteindre 50% de l'utilisation totale de batterie [35]. Il est donc nécessaire d'utiliser des algorithmes économes en énergie servant à minimiser l'utilisation des batteries pour chaque module des capteurs afin de prolonger la durée de vie du RCMSF.
- **Demande élevée de bande passante** : les capteurs sont caractérisés par une bande passante limitée, par contre un flux multimédia demande une large bande passante par rapport à la capacité réelle des nœuds. Pour fournir une bande passante adéquate, des solutions logicielles ou bien matérielles sont indispensables afin de prendre en charge la transmission des flux multimédias.
- **Exigences de QoS spécifiques aux applications** : en plus des données scalaires, les RCMSFs capturent des contenus multimédias qui comprennent des snapshots (images instantanées) et des streamings vidéos. Ces snapshots incluent des observations produites par un événement, obtenus pendant un court laps de temps. Le streaming vidéo est généré pendant de longues périodes et demande une diffusion continue de données. Dans ce cas, des algorithmes fiables sont nécessaires afin de

garantir la QoS requise. En fait, la masse importante des flux multimédias qui circulent dans un RCMSF demande un certain niveau de QoS qui se traduit par quatre paramètres fondamentaux : le délai de bout en bout, la gigue, le débit, et le taux de livraison de paquets.

- **Capacité variable du canal** : le délai et la capacité atteints sur chaque lien dépendent de la localisation des noeuds et des perturbations causées par certains phénomènes tels que la présence d'obstacles, le dysfonctionnement des certains, etc .. Ces facteurs rendent la fourniture de QoS une tâche difficile.
- **Couplage inter-couche de fonctionnalités** : dû au médium de communication partagé, il existe une interdépendance stricte entre les fonctionnalités des couches de la pile protocolaire. Cette interdépendance doit être considérée lors de la conception de protocoles de communication servant à offrir la QoS.
- **Encodage du contenu multimédia** : les données multimédias non compressées demandent une large bande passante pour une transmission multi-sauts. Il existe deux techniques de compression de contenus multimédias [36] : la compression intra-frame et la compression inter-frame. La compression intra-frame réduit les redondances dans une frame tandis que la compression inter-frame exploite les redondances dans les autres frames. La compression peut être effectuée de deux manières [37] : sans ou avec perte de données. Le deuxième type est le plus pertinent pour une transmission à faible débit et pour la diminution des coûts. Le codage de prédiction nécessite des algorithmes de traitement fiables, de codeurs complexes et un niveau élevé de consommation d'énergie ce qui ne convient pas aux noeuds multimédias peu coûteux. Les algorithmes de traitement peuvent être exécutés localement (centralisés) ou à l'intérieur du réseau (distribués) à cause de la restriction énergétique. L'algorithme de traitement en réseau est une technique qui associe des fonctions complexes à un capteur intermédiaire sélectionné pour fusionner les paquets de données provenant du noeud source. Cela nécessite de nouvelles architectures pour accomplir le traitement collaboratif réparti.
- **Couverture** : les noeuds multimédias sont caractérisés par un champ de vision limité, un mauvais emplacement de ces derniers rend certains capteurs non efficaces. Par conséquent, une répartition efficace des capteurs est exigée pour garantir une couverture optimale et une détection précise de la scène observée. Le champ de vision est une métrique à prendre en considération par les algorithmes d'optimisation de couverture dans les RCMSFs.
- **Scalabilité** : les applications spécifiques à des zones difficiles nécessitent un déploiement d'un grand nombre de noeuds (le nombre de capteurs déployés peut atteindre des milliers). Ce nombre augmenté ne doit pas affecter les performances du réseau. Les solutions proposées dans les RCMSFs doivent donc tenir compte le passage à l'échelle.
- **Tolérance aux pannes** : La défaillance d'un certain nombre de noeuds peut être causés par l'épuisement de batteries ou par endommagement matériel. Cette défaillance ne doit pas influencer le fonctionnement du réseau pour garantir la fiabilité

des données communiquées et assurer la QoS. La tolérance aux pannes représente la capacité de prendre en charge les fonctionnalités d'un RCMSF sans provoquer d'interruptions en cas de défaillance d'un ou plusieurs nœuds. Elle dépend également de l'environnement de déploiement des RCMSFs [38]. Si les nœuds sont déployés dans un habitat, le réseau exige une basse tolérance aux pannes puisque le degré d'endommagement des nœuds est diminué alors que si le RCMSF est installé dans un environnement hostile, la tolérance aux pannes devrait être plus élevée en raison de la criticité de l'application.

- **Sécurité** : les applications de contrôle nécessitent une protection plus élevée des données capturées. Des techniques de confidentialité, d'intégrité et d'authentification doivent être employées dans ce genre d'applications. Les algorithmes de chiffrement développés pour les RCMSFs doivent prendre en considération les ressources limitées des nœuds.
- **Interférence** : le routage multi-chemin est la solution la plus efficace dans les RCMSFs pour faire circuler une grande masse de données tout en préservant l'énergie. Néanmoins, ce type de routage peut produire des interférences entre les chemins adjacents lorsque plusieurs sources communiquent leurs données en même temps au nœud puits. Par conséquent, les collisions peuvent survenir et le taux de livraison de paquets avec succès sera réduit.
- **Coût de fabrication** : pour supporter le passage à l'échelle (déploiement d'un grand nombre de capteurs) le capteur multimédia doit être moins coûteux et le coût total du RCMSF doit être inférieur au coût global d'un réseau classique pour illustrer son intérêt.

1.4 Comparaison entre les RCSFs et les RCMSFs

Le tableau 1.2 résume les principales différences entre les réseaux de capteurs traditionnels sans fil (RCSFs) et les réseaux de capteurs multimédias sans fil (RCMSFs).

1.5 Routage dans les RCMSFs

Le routage est considéré parmi les objectifs essentiels de la conception des RCMSFs où la couche réseau joue un rôle primordial pour établir la communication entre une paire de nœuds (source et puits). Le routage est le moyen de découvrir les éléments du réseau, d'acheminer les paquets d'un nœud à un autre, et de maintenir les liaisons de communication en cas de panne. Afin de garantir la connectivité du réseau, chaque nœud peut être impliqué pour participer au routage. Les protocoles de routage dans les RCMSFs doivent assurer une communication fiable des données capturées en prenant en considération les critères d'acheminement définis par l'application considérée. Dans ce contexte, de nombreuses solutions de routage ont été proposées dans la littérature pour les RCMSFs pour répondre aux besoins des applications. Ces solutions de routage peuvent être classées selon différents critères incluant : la structure du réseau et la technique de routage.

TABLE 1.2 – Comparaison entre les RCMSFs et les RCSFs [9]

	RCSFs	RCMSFs
Applications	Surveillance de divers paramètres physiques, surveillance de l’habitat, surveillance de la qualité de l’air ou de l’eau, surveillance des dangers, surveillance des catastrophes	Surveillance multimédia, évitement de trafic, application et contrôle, surveillance environnementale, contrôle des processus industriels
Architecture	Architecture plate, architecture hiérarchique	Plat à un niveau, hiérarchique à un seul niveau, hétérogène multi-niveau
Défis de conception	Capacité énergétique limitée, ressources matérielles limitées, déploiement massif et aléatoire, environnement dynamique et peu fiable	Codage de source multimédia, demande élevée de bande passante, exigences de QoS spécifiques à l’application, traitement multimédia en réseau, consommation d’énergie, couverture, contraintes de ressources, capacité de canal variable, détection contextuelle, interconnexion avec d’autres réseaux
Matériel	Ordinateurs personnels à usage général améliorés (PC), nœuds de capteurs dédiés, et nœuds de capteurs système sur puce (SoC)	Capteurs audio, capteurs à résolution basse, et capteurs vidéo à résolution moyenne
Sécurité	Dépend de l’application	Dépend de l’application
QoS	Dépend de l’application	Très important
Vie privée	Nécessaire	Important car le contenu multimédia peut révéler l’identité ou l’emplacement de l’expéditeur

1.5.1 Structure du réseau

En considérant la structure du réseau, on peut distinguer trois catégories : le routage plat, le routage basé sur la localisation et le routage hiérarchique.

1. Routage plat

Un RCMSF plat est un réseau dans lequel tous les nœuds sont homogènes et ont des fonctions identiques de détection et de traitement à l’exception du nœud puits qui a le rôle d’une passerelle et qui est responsable de la communication de données collectées à l’utilisateur final (voir figure 1.12). Dans cette architecture, les capteurs transmettent les données directement au nœud puits à travers un mode de communication multi-sauts. Ce type d’architectures permet une tolérance aux pannes élevée mais il ne permet pas le passage à l’échelle [39]. En effet, si tous les capteurs fonctionnent de la même manière (d’une manière distribuée), pour garantir un bon fonctionnement des RCMSFs, un grand nombre de paquets de contrôle est nécessaire.

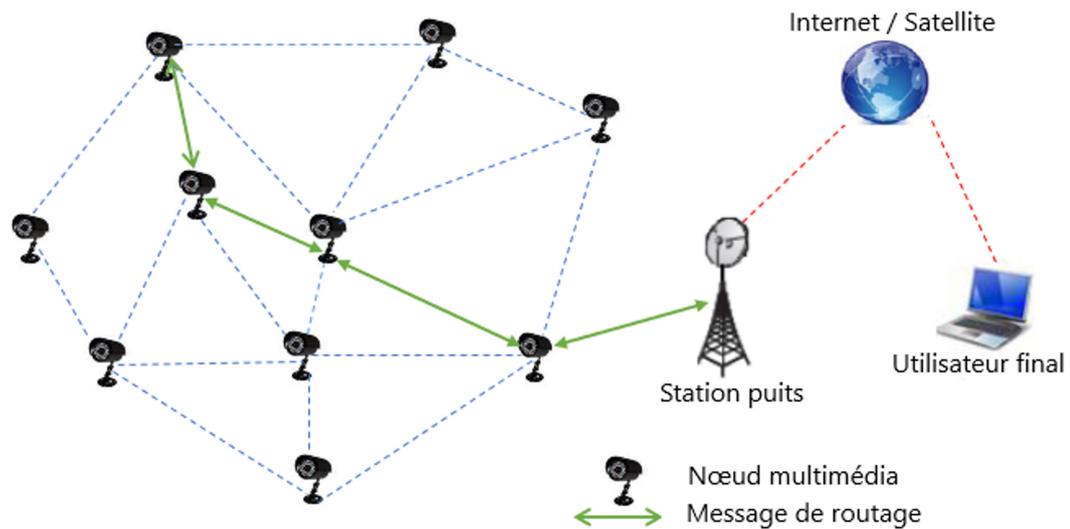


FIGURE 1.12 – Topologie plate

2. Routage basé sur la localisation (géographique)

Dans le routage géographique, la décision d'acheminement de données se base sur la localisation des nœuds. En effet, chaque nœud capteur doit connaître son emplacement géographique, ceux de ces voisins à un saut et aussi celui du nœud puits. Un nœud peut obtenir ses coordonnées physiques par le déploiement d'un système de positionnement comme par exemple un récepteur GPS [40]. Néanmoins, l'utilisation de ce dernier reste coûteuse pour les RCMSFs. Par ailleurs, il existe d'autres solutions de localisation basées sur l'estimation à travers l'utilisation d'algorithmes de localisation comme ceux présentés dans [41, 42]. Chaque nœud obtient les localisations de ses voisins par l'échange des paquets "Hello", tandis que l'emplacement physique du nœud puits peut être inclus dans le paquet par la source ou bien pré-configuré si les destinations sont connues à priori.

3. Routage hiérarchique

À mesure que le RCMSF se développe, il devient difficile à le gérer. La hiérarchie est la structure la plus répandue pour simplifier la gestion de ce genre de réseaux. Cette structure permet de diviser les nœuds en plusieurs sous-ensembles de nœuds (groupes). La méthode la plus utilisée est le clustering où ces sous-ensembles sont nommés clusters. Ces derniers sont constitués d'un certain nombre de capteurs (membres) et un capteur appelé nœud chef "CH". Les nœuds CHs ont généralement plus de ressources énergétiques par rapport aux autres nœuds membres et ils sont responsables de relayer les données collectées par les nœuds membres directement au nœud puits ou à travers d'autres nœuds CHs. Cette topologie facilite l'intégration d'une technique d'agrégation où les nœuds membres d'un cluster transmettent leurs données collectées vers leur CH respectif et ce dernier agrège ces données en un seul paquet et le communique au nœud puits [39]. Ce type de topologie permet une préservation de l'énergie [19] car seuls les nœuds CHs accomplissent une transmission vers le nœud puits. La figure 1.13 présente un exemple d'une topologie hiérarchique.

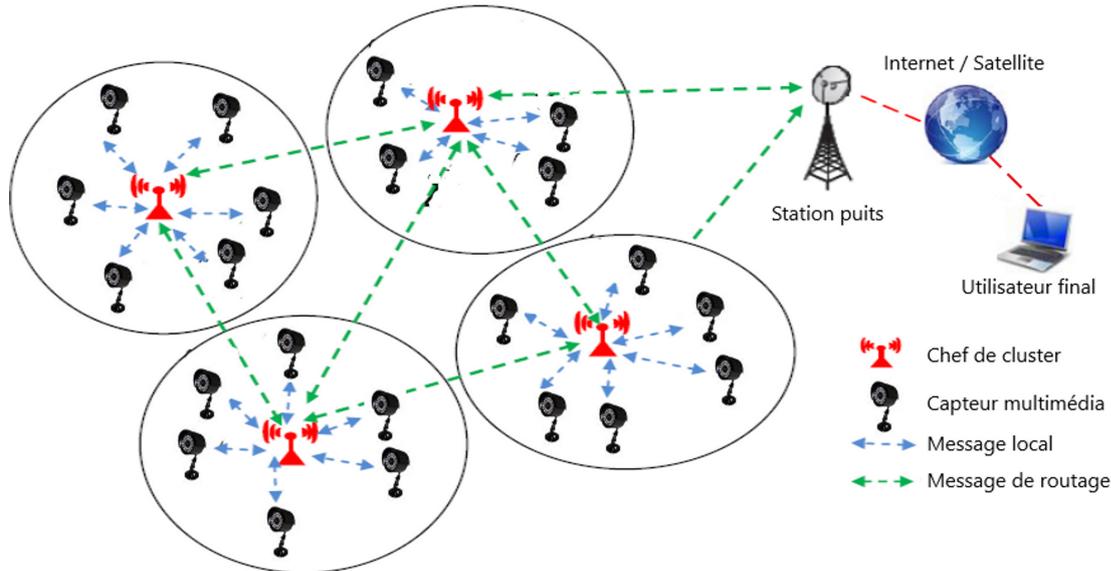


FIGURE 1.13 – Topologie hiérarchique

1.5.2 Techniques de routage

Selon le nombre de chemins utilisés pour transmettre les paquets de données du nœuds sources vers la station de base, on distingue deux types de techniques de routage : routage mono-chemin et routage multi-chemin.

1. Routage mono-chemin

Le routage à chemin unique ou bien mono-chemin (single-path) consiste à maintenir un seul chemin entre une paire de nœuds (un nœud source et la station de base) afin de transmettre les paquets de données. Ce type de routage a généralement des difficultés pour garantir la transmission fiable de données surtout en cas de ruptures de liaisons puisqu'il n'y a aucun chemin alternatif (chemin de secours) pour transmettre les données et dans cas de figure les nœuds n'ont aucun choix sauf l'abandonnement de leurs paquets actuels [43]. Cet abandonnement de paquets entraîne une dégradation du taux de livraison de paquets avec succès au nœud puits et aussi de délai de transmission puisqu'on assiste à des opérations de retransmissions. Bien que, dans les topologies hautement dynamiques, le coût de découverte d'un nouveau chemin est très élevé en termes de débit et latence [44]. De plus, le routage mono-chemin ne peut pas garantir un équilibrage de charge dans le réseau puisque certains nœuds participent rarement à l'acheminement et d'autres sont plus impliqués et transportent une grande partie du trafic du réseau. Cette distribution de charge inéquitable provoque une consommation élevée des ressources par les nœuds surexploités et conduit à une congestion dans le réseau. Tout cela entraînera une diminution des performances du réseau et de sa durée de vie ce qui rend cette approche de routage non recommandée pour la transmission de flux multimédias.

2. Routage multi-chemin

Le routage multi-chemin est l'une des techniques courantes les plus utilisées dans les RCMSFs. Cette approche de routage consiste à utiliser non seulement un seul

chemin mais un ensemble de chemins menant d'un nœud source à un nœud puits pour accomplir la transmission de données. Ces chemins peuvent être utilisés de deux manières différentes soit alternativement où un seul chemin est utilisé à un moment donné ou bien simultanément en employant plusieurs chemins à la fois. En effet, la distribution du trafic de données sur les chemins multiples sert à augmenter le débit et atteindre un taux de livraison élevé. En plus, ce type de routage assure l'équilibrage de charge entre les nœuds du réseau ce qui permet de réduire les délais de bout-en-bout et de prolonger la durée de vie du réseau. La fiabilité des solutions de routage multi-chemin est prouvée par la prémunition contre le problème de défaillance de chemins. Ce genre de routage demande plus de paquets de contrôle et de ressources énergétiques. Le routage multi-chemin est clairement recommandé pour la transmission de contenus multimédias puisqu'il sert à réduire la congestion dans le réseau et répondre aux exigences de QoS demandées par les différentes applications.

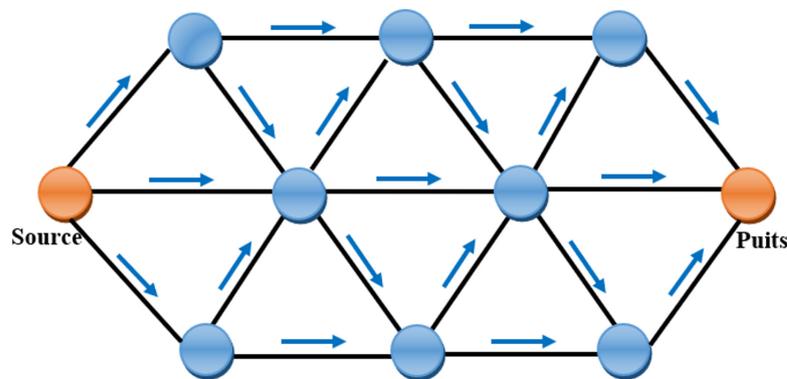


FIGURE 1.14 – Routage multi-chemin

1.5.3 Paradigme du routage multi-chemin

Le routage multi-chemin a été conçu afin de surpasser les limites du routage mono-chemin. Ainsi, contrairement au routage mono-chemin, le routage multi-chemin consiste à sélectionner plusieurs chemins entre chaque paire de nœuds (un nœud source et un nœud de destination) pour transmettre les paquets de données. Cette approche de routage basée sur des chemins multiples présente plusieurs avantages [45].

Ce genre de routage contribue à l'amélioration des performances du réseau mais il reste une approche plus complexe que celle du routage mono-chemin [46]. Chaque solution de routage multi-chemin comprend trois phases principales : la découverte des chemins, la sélection des chemins et la distribution du trafic, et la maintenance des chemins.

- **Découverte des chemins** : cette phase correspond au processus de construction des chemins où sa tâche principale est de sélectionner l'ensemble des nœuds intermédiaires pour atteindre une destination à partir d'un nœud source.
- **Sélection des chemins et répartition du trafic** : après la découverte des chemins (plusieurs chemins), une autre issue consiste à répartir le trafic sur l'ensemble des chemins afin d'augmenter les performances du réseau. En effet, selon les objectifs de chaque protocole de routage multi-chemin, un nombre prédéfini de chemins est

attribué pour chaque flux afin de répondre aux demandes de performance de l'application considérée [15]. La première approche sert à utiliser le meilleur chemin pour transmettre les flux de données et conserver les chemins restants pour une utilisation ultérieure à des fins de tolérance aux pannes [47]. La deuxième méthode consiste à répartir le trafic sur un sous-ensemble de ces chemins trouvés afin d'assurer un équilibrage de charge, réduire la congestion et aussi offrir une transmission fiable des flux de données. La troisième méthode consiste à utiliser tous les chemins établis entre le noeud source et le noeud puits pour la transmission des flux de données afin d'augmenter le taux de livraison et de réduire le délai de transmission. Néanmoins, ces deux dernières méthodes souffrent de problème d'interférences entre les chemins adjacents ce qui peut dégrader les performances du réseau [48].

- **Maintenance des chemins** : le but principal de cette phase est de valider l'ensemble des chemins trouvés et de reconstruire d'autres chemins pour remplacer les chemins défaillants. La tâche de redécouverte de chemins impose un coût très élevé surtout dans le cas où la fréquence des pannes est très élevée. La reconstruction des chemins peut être lancée dans différentes situations : soit si l'un des chemins actifs devient corrompu ou lorsqu'un ensemble de chemins actifs a échoué ou bien si tous les chemins deviennent défaillants. Les deux dernières stratégies de redécouverte de chemins peuvent réduire les performances du réseau par contre la première stratégie peut provoquer beaucoup de messages de contrôle.

a) Avantages du routage multi-chemin

L'utilisation du routage multi-chemin où plusieurs chemins peuvent exister entre le noeud source et la station de base est fortement recommandée pour les applications multimédias. Ce schéma de routage prend en compte les exigences de QoS des différentes applications multimédias en termes de délai, de fiabilité, de tolérance aux pannes, de débit, etc. Nous décrivons dans ce qui suit, les principaux avantages du routage multi-chemin :

- **Équilibrage de charge** : pour assurer l'équilibrage de charge, il faut éviter que des noeuds et des liens soient surutilisés, cela impliquera un grand nombre de noeuds dans le processus de routage ainsi qu'un schéma de routage multi-chemin sera utilisé. Par conséquent, la consommation d'énergie sera répartie uniformément entre les noeuds, de sorte que la durée de vie du réseau augmente. De plus, la congestion sera évitée car les paquets seront envoyés via des chemins différents, ce qui réduit la surutilisation des noeuds.
- **Tolérance aux pannes** : les équipements sans fil sont souvent peu fiables ; la défaillance de ces équipements peut être provoquée par l'épuisement de batteries ou par endommagement matériel (par le temps, la faune ou l'intervention humaine) [49]. Ainsi, pour traiter les pannes, la topologie du réseau doit fournir des chemins alternatifs vers le noeud puits afin qu'en cas de panne, le protocole de routage puisse toujours garantir une transmission fiable.
- **Agrégation de bande passante** : la stratégie de routage multi-chemin divise un flux de données en plusieurs parties et chaque partie est acheminée via un chemin différent vers la même destination. Par conséquent, cette stratégie peut offrir l'agrégation de la bande passante.

- **Délai réduit** : dans les protocoles de routage à un seul chemin, lorsqu'un nœud échoue, un processus de découverte de chemin vers la station de base est déclenché, et cela affecte le délai de livraison. Cependant, dans les protocoles de routage multi-chemin, le délai peut être réduit car les chemins de sauvegarde (secours) sont déterminés à l'avance pendant le processus de découverte de chemins.
- **Fiabilité des données** : la fiabilité peut être définie comme la probabilité que les paquets arrivent de la source à la destination avec succès [50]. Le routage multi-chemin peut augmenter la fiabilité des données en envoyant plusieurs copies des mêmes données sur différents chemins.
- **Sécurité des données** : les réseaux sans fil peuvent faire l'objet d'attaques. Les schémas de routage multi-chemin peuvent augmenter le niveau de sécurité du réseau car plusieurs copies d'un message peuvent être envoyées via différents chemins. Ainsi, même en présence de chemins malveillants, au moins une copie du message pourrait être transmise avec succès au nœud de destination via un chemin sécurisé. De plus, en incorporant la technique de codage avec des schémas de routage multi-chemin, les données peuvent être transmises sous une forme codée et décodée uniquement par le nœud de destination, ce qui empêche l'écoute des données de détection pendant la transmission [51].
- **Efficacité énergétique** : la consommation d'énergie des nœuds à énergie limitée dans les RCMSFs est une faiblesse critique de ces réseaux, car les nœuds de capteurs sont équipés de batteries qui ne sont généralement pas rechargeables et non remplaçables lorsque les nœuds de capteurs sont déployés dans des environnements hostiles. Par conséquent, une communication économe en énergie est une caractéristique importante pour augmenter la durée de vie du réseau. De plus, le schéma de routage multi-chemin est une solution efficace pour améliorer la durée de vie du réseau car il permet l'équilibrage de charge entre les différents nœuds qui composent le réseau.

Le routage multi-chemin est la solution la plus efficace dans les RCMSFs pour transmettre une grande quantité de données et en même temps préserver la consommation d'énergie. Cependant, ce type de routage produit des interférences entre les chemins adjacents ou bien lorsque plusieurs sources communiquent des données en même temps. Par conséquent, des collisions peuvent se produire et le taux de livraison sera réduit.

b) Types de multi-chemin

L'approche du routage multi-chemin consiste à établir un ensemble de chemins d'une façon indépendante et distribuée pour chaque nœud. En effet, la manière d'organisation des chemins a un impact sur les performances du routage. Elle est basée sur différents critères où le critère le plus prépondérant est le degré de disjonction des chemins. L'utilisation de ce degré est très importante car il aide à éliminer les boucles de communication. Selon ce critère, les chemins multiples peuvent être classés en cinq types : non-disjoints, à nœuds-disjoints, à liens-disjoints, partiellement disjoints et totalement disjoints. La détermination de modèle à utiliser dépend de la densité du réseau et des demandes de l'application prévue.

- **Chemins non-disjoints** : des chemins qui peuvent partagés entre eux des liens ou des nœuds. La figure 1.15 illustre un exemple de chemins non-disjoints.

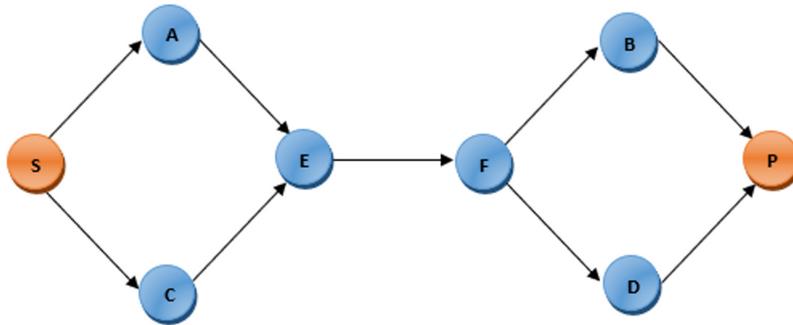


FIGURE 1.15 – Chemins non-disjoints

- **Chemins à nœuds-disjoints** : seuls le nœud source et le nœud destinataire sont partagés entre l'ensemble des chemins. Par suite, toute défaillance d'une liaison ou d'un capteur affecte uniquement le chemin qui comprend ce lien ou ce nœud. La figure 1.16 présente un exemple de chemins à nœuds-disjoints.

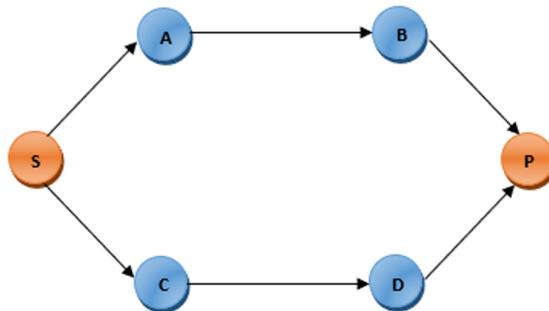


FIGURE 1.16 – Chemins à nœuds-disjoints

- **Chemins à liens-disjoints** : aucun lien n'est partagé entre les chemins multiples par contre ces chemins peuvent partagés un ou plusieurs nœuds. Par conséquent, la défaillance d'au moins d'un nœud partagé affecte l'ensemble des chemins. La figure 1.17 illustre un exemple de chemins à liens-disjoints.
- **Chemins partiellement disjoints** : plusieurs liens ou nœuds sont partagés entre l'ensemble des chemins. La figure 1.18 montre un exemple de chemins partiellement disjoints.
- **Chemins totalement disjoints** : aussi appelés chemins à zones-disjoints ; ils sont à nœuds-disjoints et en plus sont suffisamment écartés les uns des autres pour éviter les interférences entre les chemins adjacents. La figure 1.19 présente un exemple de chemins totalement disjoints.

Dans le contexte du routage multi-chemin, chaque catégorie de chemins a ses propres avantages et inconvénients. A titre d'exemple, les chemins à nœuds-disjoints peuvent

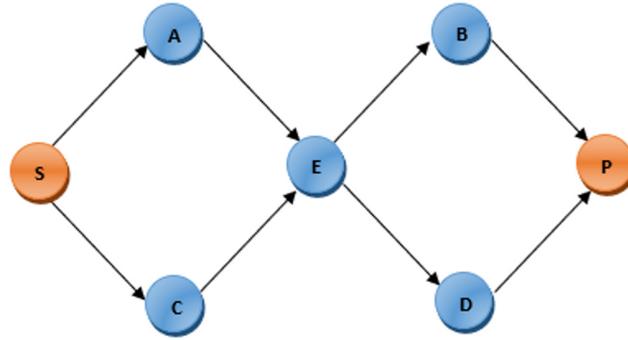


FIGURE 1.17 – Chemins à liens-disjoints

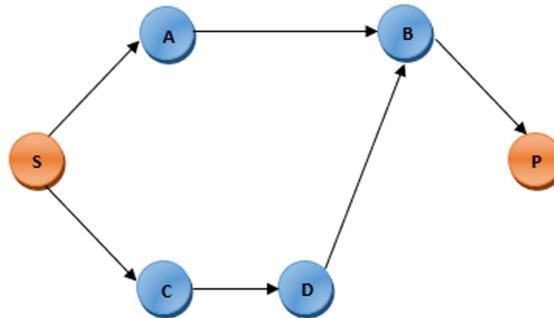


FIGURE 1.18 – Chemins partiellement disjoints

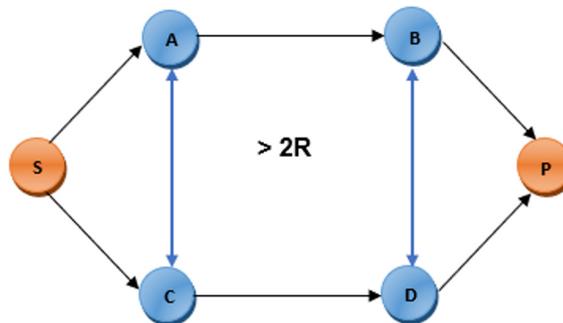


FIGURE 1.19 – Chemins totalement disjoints

faciliter l'implémentation de l'équilibrage de charge. En raison des ressources limitées des capteurs d'une part et de propriétés variables de liaisons de communication d'autre part, la prise en compte de degré de disjonction uniquement pour la construction de chemins ne peut pas garantir la découverte de chemins de haute qualité [34]. A cet effet, une fonction coût doit être ajoutée à ce degré pour construire les chemins multiples tenant en considération les exigences en QoS des applications.

1.5.4 Routage géographique

Le routage géographique est le paradigme de routage le plus populaire dans les RCM-SFs. Il présente de bonnes fonctionnalités et de nombreux avantages surtout en ce qui concerne la découverte de chemins optimaux avec la possibilité de transmission à travers

ces chemins. De plus, ce type de routage permet une évolutivité facile pour les RCMSFs. Le routage géographique fonctionne dans un mode distribué dans lequel l'ensemble des nœuds utilisent les mêmes algorithmes et les décisions sont prises à chaque étape, quelles que soient les décisions précédentes.

Dans la littérature, il existe plusieurs stratégies pour la sélection du prochain saut pour le routage géographique dans les RCSFs. Pour présenter ces politiques, nous modélisons un réseau comme suit : un RCMSF est représenté par un graphe non orienté $G = (V, E)$, où V est l'ensemble des nœuds capteurs et $E \subseteq V^2$ est l'ensemble des arêtes. Une arête $e = (u, v)$ appartient à E si et seulement si la distance qui sépare les nœuds (u et v) est inférieure ou égale à la portée de communication R c'est-à-dire que le nœud u est capable de transmettre des paquets directement au nœud v et vice versa.

Soit $N_1(u)$ l'ensemble des voisins à un saut du nœud u selon l'équation (1.3).

$$N_1(u) = \{v \in V \mid u \neq v \wedge dist(u, v) \leq R\} \quad (1.3)$$

1. **Greedy Routing (GR)** : la stratégie GR [52] est une stratégie de routage basée sur la distance. Dans la stratégie GR, un nœud source choisit comme prochain saut le voisin le plus proche de la destination parmi l'ensemble de ses voisins directs. Dans la figure 1.20a, le nœud source "c" choisit le nœud "n" comme prochain saut parmi ses voisins à 1 saut puisque le nœud "n" est le plus proche de la destination "d".
2. **Most Forwarding Routing (MFR)** : la stratégie MFR [53] est une stratégie basée sur la distance qui vise à réduire la longueur du chemin en sélectionnant le voisin ayant le plus grand progrès sur la ligne droite vers la destination comme prochain saut. Dans MFR, un nœud transmet les paquets de données au nœud le plus proche du nœud de destination pour minimiser le nombre de sauts. La figure 1.20b illustre le fonctionnement de cette stratégie de routage.
3. **Compass Routing (CR)** : la stratégie CR [54] est une stratégie de routage basée sur la direction qui prend en compte l'angle de déviation. Dans la stratégie CR, comme illustré sur la figure 1.20c, un nœud source "c" sélectionne comme saut suivant (le nœud "n") le voisin avec l'angle de déviation minimum par rapport à la ligne qui relie le nœud source actuel et la station de base.
4. **Random Compass Routing (RCR)** : la stratégie RCR [54] est une stratégie de routage basée sur la direction dans laquelle un nœud source "c" sélectionne au hasard un voisin comme prochain saut parmi ses voisins ("n" ou "m") sur l'angle le plus proche de la destination, comme le montre la figure 1.20d.
5. **Greedy Compass (GC)** : dans la stratégie de routage GC [55,56], un nœud source "c" trouve deux nœuds ("n" et "m") parmi ses voisins de telle sorte que le nœud "n" forme le plus petit angle dans le sens antihoraire \widehat{ncd} et le nœud "m" forme le plus petit angle \widehat{mcd} dans le sens des aiguilles d'une montre. Le voisin le plus proche de la destination "d" parmi les deux voisins ("n" et "m") est choisi comme prochain saut.
6. **Nearest Neighbor routing (NN)** : dans la stratégie de routage NN [7], comme illustré dans la figure 1.20e, sur la base d'un angle donné \hat{a} , un nœud source "c"

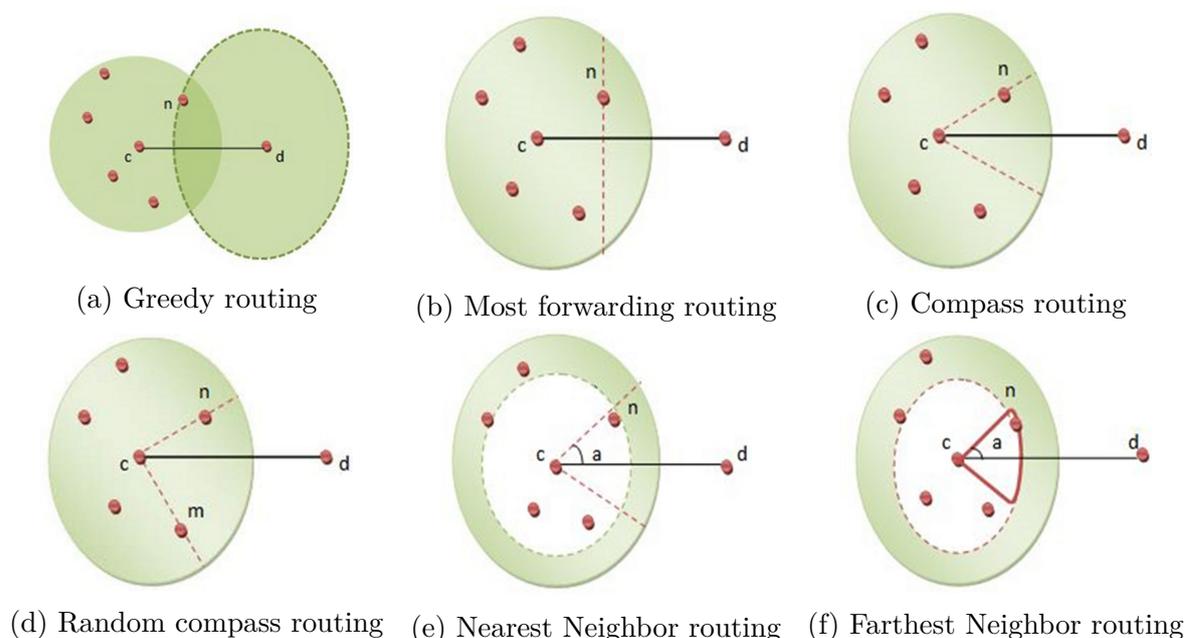


FIGURE 1.20 – Différentes stratégies de "Greedy forwarding"

sélectionne le voisin le plus proche "n" parmi ses voisins comme saut suivant dans une topologie donnée telle que $\widehat{ncd} \leq a$.

7. **Farthest Neighbor routing (FN)** : dans la stratégie de routage FN [7], comme le montre la figure 1.20f, sur la base d'un angle donné \hat{a} , un nœud source "c" sélectionne le voisin le plus éloigné "n" parmi ses voisins comme saut suivant dans une topologie donnée telle que $\widehat{ncd} \leq a$.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les RCMSFs. En effet, au début nous avons présenté l'élément de base d'un RCMSF qui est le capteur multimédia où nous avons décrit sa composition et ses caractéristiques ainsi que quelques plateformes. Ensuite, nous avons exposé les différents aspects de ce type de réseaux : définition, caractéristiques et domaines d'applications. Nous avons montré que les RCMSFs exigent que certaines métriques de la QoS soient prises en considération pour chaque couche de la pile protocolaire. Par conséquent, une description du modèle de communication est présentée. Puis nous avons détaillé plusieurs volets sur RCMSFs à savoir le modèle de surveillance, les topologies, la consommation d'énergie, les exigences de qualité de service et les technologies sans fil. Enfin, nous avons présenté les principaux défis des RCMSFs, le routage dans ce type de réseaux et sa spécificité.

Dans le chapitre suivant, un état de l'art sur le routage multi-chemin est proposé ainsi qu'une comparaison entre les différents protocoles de routage multi-chemin. Ensuite, une nouvelle classification de routage géographique multi-chemin est proposée afin d'extraire les avantages et les inconvénients et enfin une comparaison entre les protocoles décrits dans la littérature est présentée.

Chapitre 2

État de l'art sur le routage
multi-chemin dans les réseaux de
capteurs multimédias sans fil

Chapitre 2

État de l'art sur le routage multi-chemin dans les réseaux de capteurs multimédias sans fil

2.1 Introduction

L'un des objectifs dans la mise en œuvre des RCSFs est le routage ; il est considéré comme une fonction critique et importante à la fois. Le problème de routage est de trouver la manière à déterminer et à maintenir le chemin le plus approprié pour faire délivrer les flux de données d'un nœud source vers un nœud puits. Cette tâche doit donc prendre en compte les caractéristiques inhérentes des nœuds en termes de contraintes énergétiques, de capacité de calcul, de stockage et celle de communication afin de garantir les meilleures performances du réseau : durée de vie, délai de réponse, fiabilité, etc.

La couche réseau est responsable de l'implémentation d'un plan d'adressage pour délivrer les paquets de données dans le réseau. Elle construit principalement des routes pour l'acheminement des paquets de données entre les nœuds. Comparé aux réseaux de capteurs traditionnels (RCSFs), le routage est plus compliqué dans les réseaux de capteurs multimédias puisqu'ils présentent les mêmes limitations en ressources que les RCSFs traditionnels mais ils manipulent des données multimédias volumineuses avec différents niveaux de priorité. En outre, les protocoles de routage doivent assurer un certain niveau de QoS exigé par les applications envisagées dans ce type de réseaux tout en considérant les limitations des nœuds. Les paramètres de la QoS peuvent comprendre les besoins de la bande passante pour le streaming multimédia, la qualité des flux, l'efficacité énergétique, la gigue, le délai de transmission, la latence, la fiabilité, etc. Par suite, des solutions de routage appropriées sont nécessaires pour répondre aux différentes exigences des RCMSFs.

Le routage multi-chemin est généralement considéré comme une approche fiable afin d'optimiser les performances des communications dans les RCMSFs. Ce paradigme de routage consiste à établir des chemins multiples entre le nœud source et la station de base pour transférer les paquets de données. Il peut offrir plusieurs avantages comme l'équilibrage de charge, l'agrégation de bande passante, la fiabilité des données, etc [57–59]. Cependant, le problème majeur du routage multi-chemin reste les interférences entre les chemins adjacents. Certains travaux ont focalisé sur le problème de la minimisation des interférences issues de l'établissement de plusieurs chemins [60, 61].

Le routage géographique est un type important de routage multi-chemin dans les RCMSFs. Dans ce type de schéma de routage la décision de routage est prise localement en fonction de l'emplacement géographique des nœuds. Un nœud source choisit un nœud relais pour transférer des paquets de données en fonction de son emplacement géographique, l'emplacement de ses voisins à un saut et celui de la station de base. La stratégie de transfert la plus utilisée dans le routage géographique est la transmission gloutonne "Greedy Forwarding", où le prochain saut est sélectionné en fonction des informations locales sur chaque voisinage à un saut de chaque nœud. Plusieurs protocoles de routage géographique multi-chemin ont été proposés dans la littérature.

Dans ce chapitre, nous présentons deux états de l'art sur les protocoles de routage multi-chemin conçus pour les RCMSFs. Dans le premier état de l'art nous dressons une classification des solutions de routage multi-chemin proposées dans la littérature basée sur l'objectif de routage et ensuite une comparaison entre ces protocoles de routage en fonction de certains critères de performances de routage est présentée afin de mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chaque protocole. Le deuxième état de l'art est une étude qui porte sur les protocoles de routage géographique multi-chemin dans les RCMSFs où une classification basée sur les caractéristiques des protocoles originaux et leurs dérivés est proposée ainsi qu'une comparaison basée sur plusieurs critères entre ces solutions est présentée pour extraire les avantages et les limitations de chaque protocole géographique. La présentation de ces solutions de routage nous permet de tirer profit de chacun d'elles pour proposer une solution de routage efficace pour les RCMSFs.

2.2 Classification des protocoles de routage multi-chemin dans les RCMSFs

Les applications multimédias sont devenues une partie intégrante de notre quotidien, et leur utilisation augmente de jour en jour. Ceci a motivé la communauté scientifique et les industriels de fournir plus d'efforts pour développer une large gamme de capteurs multimédias et à moindre coût. Par ailleurs, le routage des données multimédias dans les RCMSFs est considéré comme un problème plus crucial que celui dans les RCSFs en raison de la grande quantité de données nécessitant d'être transférée et les ressources limitées des capteurs en termes d'énergie et de capacité de calcul. Le routage multi-chemin est une stratégie efficace pour transmettre les flux multimédias dans les RCMSFs car il peut fournir les exigences de la QoS. Dans ce contexte, plusieurs solutions de routage multi-chemin ont été développées pour les RCMSFs. Notre étude de ces solutions nous a permis de les classer selon l'objectif de routage en cinq catégories [45], comme le montre la figure 2.1. Nous passons en revue chacune de ces catégories dans les sous-sections suivantes.

2.2.1 Équilibrage de charge

L'équilibrage de charge est une fonctionnalité très importante pour prolonger la durée de vie du réseau car il vise à impliquer un grand nombre de nœuds dans le processus de livraison des données. La consommation d'énergie sera donc uniformément répartie entre les nœuds et par conséquent, la durée de vie du réseau sera prolongée. De plus, les protocoles de routage multi-chemin favorisent grandement l'équilibrage de charge, en

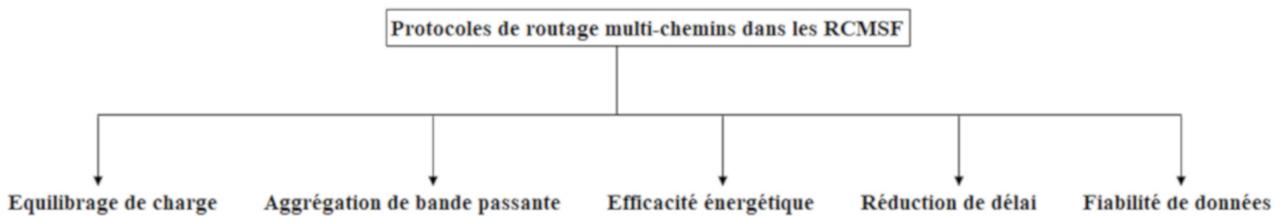


FIGURE 2.1 – Protocoles de routage multi-chemin dans les RCMSFs

transférant le trafic sur plusieurs chemins pour éviter d'avoir des nœuds ou des liens surutilisés. Dans ce qui suit, nous présentons les principaux protocoles de routage visant l'équilibrage de charge entre les nœuds et les liens.

a) Le protocole TinyONDMR

Le protocole "Optimised Node-Disjoint Multipath Routing protocol (TinyONDMR)" a été proposé dans [6], est un protocole de routage à la demande qui trouve plusieurs chemins à nœuds-disjoints pour éviter la congestion sur les liens de communication et les nœuds communs. TinyONDMR est une version améliorée du protocole "Split Multipath Routing protocol (SMR)" [62]. Ce protocole utilise principalement trois schémas pour construire des chemins multiples à nœuds-disjoints entre la source et la destination : une approche de routage source, le plus petit nombre de sauts et le filtrage des chemins superposés. Dans l'approche de routage source, les informations des nœuds qui appartiennent au chemin sont incluses dans le message "ROUTE REQUEST (RREQ)". Lorsque le nœud source a besoin d'un chemin vers la destination et aucune information sur cette destination n'est connue, il diffuse un message RREQ à tous les nœuds du réseau. Par conséquent, la station de base est atteinte via plusieurs chemins, elle sélectionne ainsi plusieurs chemins disjoints et renvoie des messages "ROUTE REPLY (RREP)" au nœud source via les chemins choisis. Un exemple de routage source est illustré dans la figure 2.2.

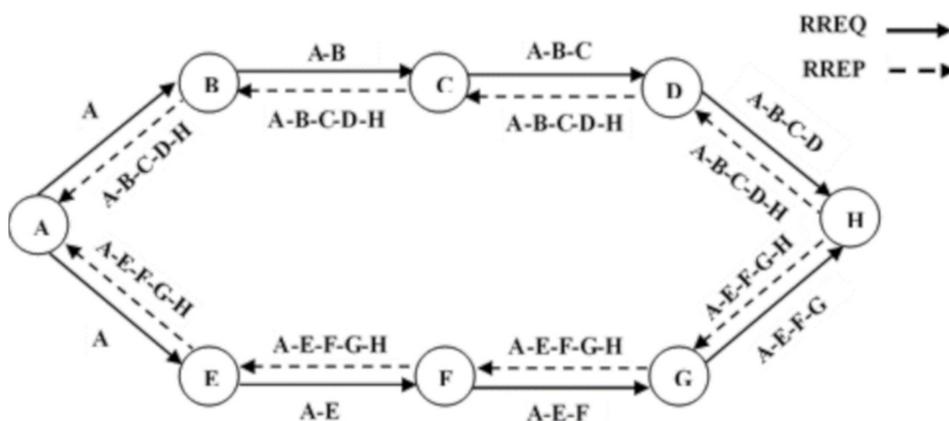


FIGURE 2.2 – Routage source [6]

Dans les protocoles de routage à la demande, le nœud source diffuse généralement des messages RREQ pour trouver un chemin vers la destination. Lorsqu'un nœud intermédiaire reçoit un message RREQ pour la première fois, il le diffuse à son tour. Après avoir

reçu ce message pour la première fois, les messages RREQ en double sont supprimés. Cependant, les messages RREQ en double doivent être transférés vers la destination pour créer plusieurs chemins de routage. Mais le problème est que si tous les messages RREQ dupliqués sont transférés, cela entraîne une surcharge de routage très élevée et cela entraînera une dégradation des performances du protocole. Pour surmonter cette limitation, TinyONDMR utilise une méthode de transfert de paquets basée sur le plus petit nombre de sauts. Dans cette méthode, les nœuds intermédiaires reçoivent tous les paquets RREQ pendant une période prédéfinie, puis ils diffusent les paquets RREQ dupliqués qui ont le plus petit nombre de sauts. La figure 2.3 montre un exemple de propagation des messages RREQ avec le plus petit nombre de sauts.

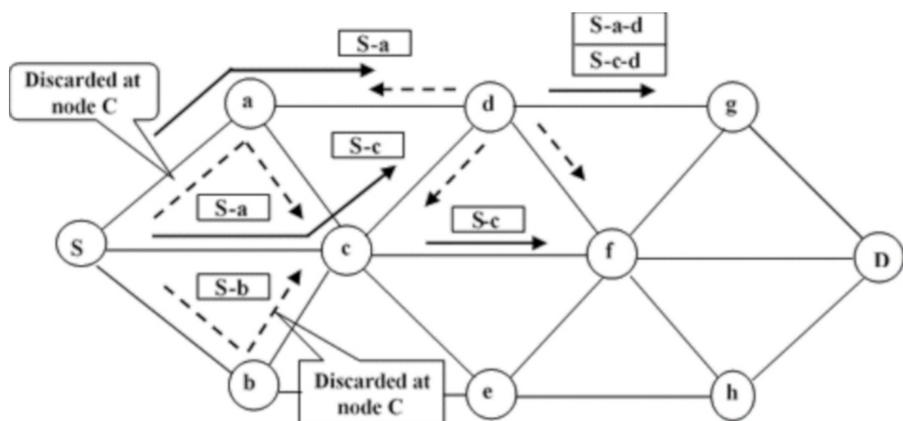


FIGURE 2.3 – Propagation des messages RREQ ayant le plus petit nombre de sauts [6]

En outre, pour réduire la surcharge de routage, ce protocole introduit une méthode pour filtrer les chemins superposés par les nœuds intermédiaires. L'exemple présenté dans la figure 2.4 illustre le principe de cette méthode. Dans cet exemple, le nœud "g" recevra trois messages RREQ, qui indiquent trois chemins $[S-a-d]$, $[S-c-d]$ et $[S-c-f]$. Ces trois chemins ont le même nombre de sauts, avant la transmission, le nœud "g" vérifie si les chemins sont disjoints ou non. S'il y a des chemins qui se chevauchent, l'un d'entre eux sera ignoré pour garantir la disjonction (voir figure 2.4). Le chemin $[S-c-d-g]$ a un lien commun chevauché $[d-g]$ avec le chemin $[S-a-d-g]$. Il a également un lien chevauché $[S-c]$ avec le chemin $[S-c-f-g]$. TinyONDMR prend en charge plusieurs chemins à nœuds-disjoints et permet de fournir de meilleures performances puisque l'équilibrage de charge est effectué entre tous les nœuds du réseau.

b) Le protocole LBHR

Les auteurs dans [63] ont proposé un protocole de routage hiérarchique basé sur l'équilibrage de charge pour les RCMSFs, appelé "Load Balancing-based Hierarchical Routing protocol (LBHR)". Dans le protocole LBHR, au début, le réseau est divisé par un nouvel algorithme de regroupement dans lequel le chef de cluster est sélectionné en fonction du poids de chaque nœud dans un cluster, et le nœud ayant le poids le plus petit a la priorité la plus élevée pour devenir cluster head. Le poids d'un nœud est calculé en fonction de son degré et de son énergie restante. Après la sélection des CHs, ces derniers envoient un message "CH_Msg" à leurs voisins en leur demandant de les rejoindre. Chaque voisin sélectionne le cluster approprié pour le rejoindre et envoie un message "Join_Req" à son CH

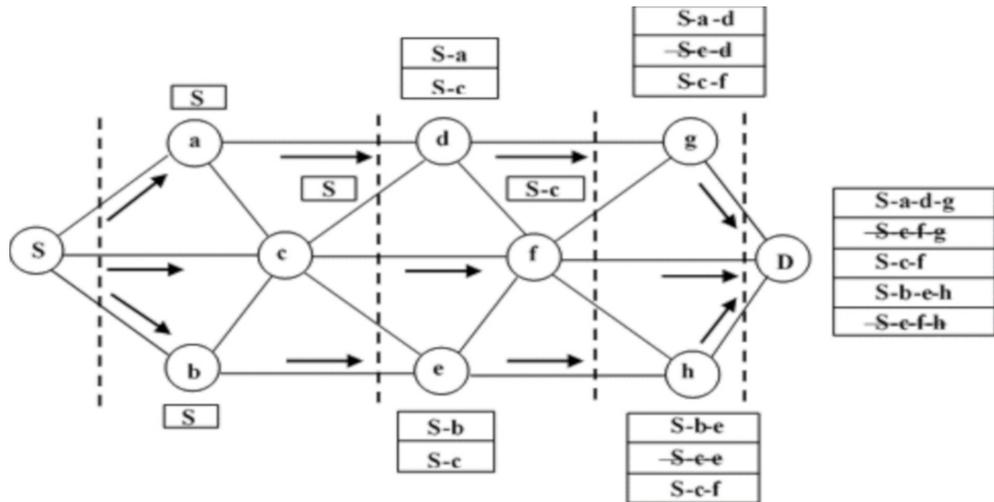


FIGURE 2.4 – Propagation des messages RREQ sans chevauchement [6]

correspondant. Si le CH accepte sa demande d'adhésion, alors il lui enverra un message "Allow_Join", sinon, il lui enverra un message "Rej_Join". Si le nœud reçoit des messages "Rej_Join" et ne reçoit aucun message "Allow_Join" des autres CHs pendant une période prédéfinie, il se déclarera en tant que CH indépendant. Ensuite, le schéma de routage inter-cluster est construit en utilisant l'algorithme d'optimisation améliorée des colonies de fourmis pour trouver un chemin principal et des chemins alternatifs. Lorsque la quantité de données est supérieure au débit maximum du chemin principal, le CH source implique un autre chemin pour transmettre les données multimédias. Enfin, le schéma de routage intra-cluster est établi à l'aide de l'algorithme d'arbre couvrant minimum, dans lequel un arbre de routage hiérarchique est construit par l'algorithme ci-dessus. Les capacités des membres du cluster dans l'arborescence descendent du haut vers le bas. Les membres du cluster envoient les données agrégées à leur CH correspondant à l'aide de l'arborescence de routage hiérarchique intra-cluster, tandis que les CHs envoient les données agrégées à la station de base en utilisant le schéma de routage inter-cluster. L'analyse théorique et les résultats de simulation montrent que le protocole LBHR peut réaliser un équilibrage de charge, réduire le délai de bout en bout et améliorer le taux de livraison des paquets avec succès. En outre, ces résultats ont montré également que le protocole LBHR permet le passage à l'échelle, prolonge efficacement la durée de vie du réseau et garantit la qualité de service de la transmission de données par rapport à d'autres protocoles de routage auxquels il était comparé.

c) Le protocole de Xie et al.

Ce protocole de routage est réalisé en deux étapes [64]. Dans la première étape, un ensemble de chemins à nœuds-disjoints est déterminé à l'aide d'une méthode de recherche étonnante, qui consiste en une expansion du front d'onde et un retour en arrière du chemin. Dans l'expansion du front d'onde, l'ensemble d'obstacles initial est composé de tous les nœuds situés dans un trou en boucle fermée ou ouverte qui sont marqués et lorsque le front d'onde est étendu, les nœuds valides impliqués de la source à la destination sont étiquetés avec un numéro décroissant et ils sont fusionnés dans l'ensemble d'obstacles en tant

qu'obstacles temporaires. Pendant l'expansion du front d'onde, si le front d'onde atteint un nœud bloqué (nœud qui ne peut pas trouver le saut suivant pendant la construction de chemins), il est immédiatement fusionné dans l'ensemble d'obstacles. Dans le retour en arrière du chemin, l'algorithme commence par la destination vers la source et sélectionne comme saut suivant le nœud dont le numéro de balise est supérieur à celui du nœud actuel. Lorsque le nœud source est atteint, le chemin de routage est généré et tous les nœuds d'obstacles temporaires à l'exception des nœuds appartenant au nouveau chemin de routage sont supprimés de l'ensemble d'obstacles. L'algorithme est toujours en cours d'exécution jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de nouveaux chemins de routage. Ensuite, il sélectionne un chemin de routage dans l'ensemble des chemins de routage trouvés. Dans cette étape, un nouveau message de contrôle de la congestion, une stratégie d'augmentation graduelle basée sur les chemins et une stratégie d'augmentation graduelle basée sur les flux sont introduits pour équilibrer la charge et la consommation d'énergie entre les nœuds.

d) Le protocole AGEM

Medjiah et al. [7,8] ont proposé le protocole "AGEM" qui convient à la transmission de flux multimédia dans les RCMSFs. Dans AGEM, à chaque saut, un nœud émetteur décide par quel voisin il enverra le paquet en fonction de sa position. De plus, ce protocole exploite les capacités multi-chemins pour équilibrer la charge du trafic et minimiser la consommation d'énergie entre les nœuds. Le schéma de routage AGEM a deux modes : le routage glouton intelligent (smart greedy forwarding) et le routage en marche arrière (walking back forwarding). Le premier mode est utilisé lorsqu'il y a toujours un voisin plus proche du nœud récepteur que le nœud émetteur, tandis que le second est utilisé pour sortir d'une situation de blocage dans laquelle le nœud émetteur ne peut plus transmettre le paquet vers le nœud récepteur. La figure 2.5 présente un schéma général de commutation des deux modes de routage dans le protocole AGEM.

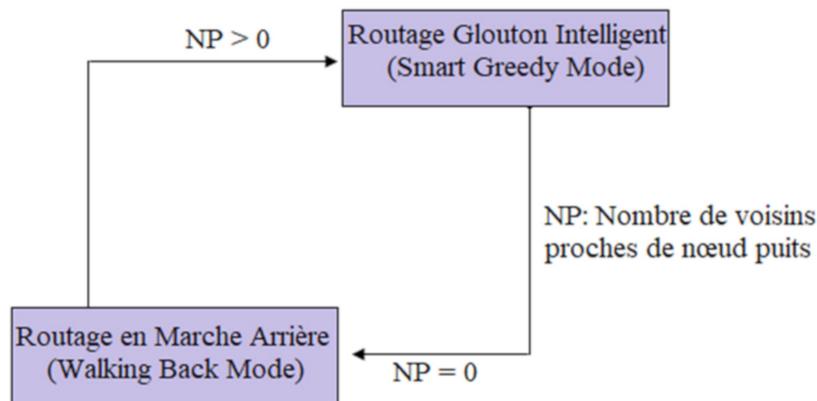


FIGURE 2.5 – Commutation des deux modes de routage dans AGEM [7,8]

Dans ce qui suit, nous détaillons les deux modes de routage dans AGEM :

- **Routage glouton intelligent (smart greedy forwarding)** : dans le protocole AGEM, tous les nœuds connaissent leurs coordonnées géographiques (localisation)

et chaque nœud stocke des informations à propos de ses voisins à un saut. Ces informations comprennent la distance estimée à ses voisins, la distance de chaque voisin au nœud puits, l'énergie restante et le débit de lien. Sur la base de ces informations, un nœud transmetteur attribue un score à chaque voisin selon une fonction d'objectif appelée "f(x)". Ce schéma de routage tente de sélectionner les voisins avec le meilleur décalage angulaire vers la destination. Au début, le nœud transmetteur ne choisit que les nœuds voisins qui sont les plus proches de la destination et qui sont dans l'angle $\alpha < 30^\circ$. Un minimum de "n" nœuds voisins (ensemble des voisins dont la taille est supérieure ou égale à 2) doit être trouvé pour effectuer l'équilibrage de charge. Si ($n = 1$) alors il n'y a qu'un seul nœud dans l'ensemble des voisins, donc aucun équilibrage de charge ne peut être réalisé. Si aucun nœud n'est trouvé, l'angle est incrémenté par un pas de 10° jusqu'à ce qu'il atteigne 180° . A cette phase, si aucun nœud n'est trouvé, alors le routage en marche arrière est nécessaire puisque le nœud transmetteur fait face à un trou de routage (zone vide). La figure 2.6 présente cette politique de l'auto-adaptation de l'angle de vue.

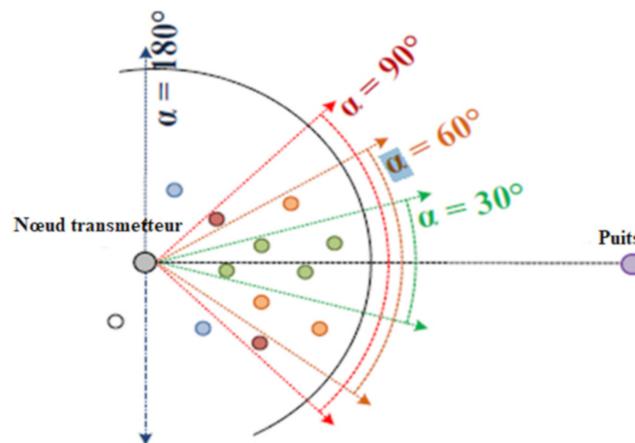


FIGURE 2.6 – Adaptation de l'angle de vue [7]

- **Routage en marche arrière (walking back forwarding)** : Lorsqu'un nœud transmetteur est en face d'un trou où il n'y a pas de voisin plus proche du nœud puits que lui-même, ce nœud exécute le mode de routage en marche arrière afin de contourner ce trou de routage (zone vide). Dans un tel cas (voir figure 2.7), le nœud transmetteur informe tous ses voisins qu'il ne peut pas être considéré comme un nœud relais pour relayer des paquets au nœud puits. Ce nœud déléguera également la responsabilité de transmission à son voisin le plus proche pour contourner la zone vide. Ce processus recule de manière récursive jusqu'à ce qu'un nœud soit trouvé qui puisse transmettre le paquet avec succès.

e) Le protocole GEAM

Les auteurs dans [65] ont proposé le protocole "Geographic Energy-Aware non-interfering Multipath protocol (GEAM)" pour acheminer les données multimédias dans les RCMSFs à travers plusieurs chemins d'une manière efficace. Ce protocole divise la topologie du réseau en plusieurs districts et transmet les données à travers ces districts sans interférer les

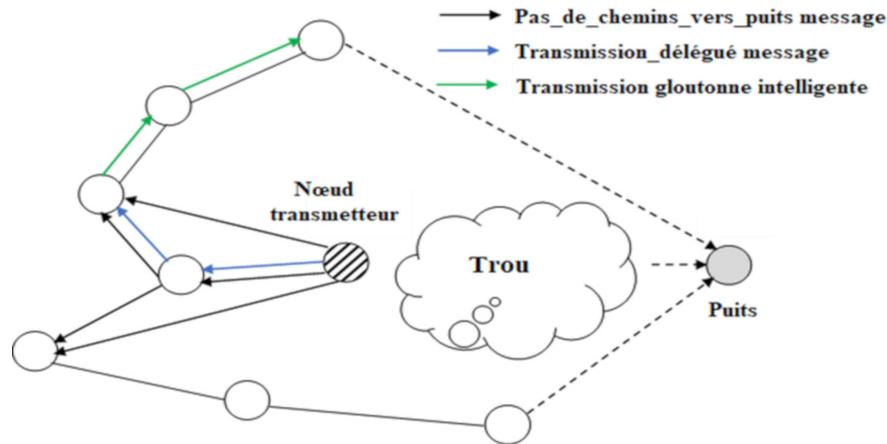


FIGURE 2.7 – Routage en marche arrière [7]

uns avec les autres, ce qui se traduit par des transmissions sans interférences. Il gère également la charge dans chaque district en fonction de l'état énergétique des nœuds (l'énergie restante des nœuds) et ainsi les performances du routage sont préservées même lorsque la topologie change. Pour transmettre un paquet, GEAM attribuera le paquet avec la limite de district et il l'envoie à travers le district vers le nœud puits en utilisant un algorithme glouton. L'utilisation de l'ajustement de district pour la sélection des chemins avec moins de sauts réduira également le problème des trous d'énergie. Cependant, l'utilisation de nombreuses paires source-puits peut réduire l'efficacité globale.

2.2.2 Agrégation de bande passante

Les données multimédias sont trop volumineuses dans les RCMSFs, le routage multi-chemin consiste à diviser un flux de données en plusieurs parties et à acheminer chaque partie par un chemin différent vers la destination. Cette stratégie peut fournir l'agrégation de bande passante.

a) Le protocole DGR

Le protocole "Directional Geographical Routing protocol (DGR)" [66] établit plusieurs chemins disjoints pour transmettre des flux vidéos H.26L protégés par FEC en temps réel et d'une manière parallèle dans un environnement peu fiable et à bande passante limitée. Pour cela, le protocole DGR divise un seul flux vidéo en plusieurs sous-flux et exploite plusieurs chemins disjoints entre les nœuds de capteurs (vidéos) et le nœud puits pour transmettre ces sous-flux de manière parallèle. Par conséquent, cette stratégie lui permet d'équilibrer la charge, d'agréger la bande passante et de transmettre rapidement les paquets. De plus, le protocole DGR fournit un délai réduit et augmente la durée de vie du réseau. Néanmoins, il ne permet pas un équilibrage de charge à proximité du nœud puits avec succès puisque plusieurs chemins disjoints convergeront vers une proximité étroite les uns des autres en se rapprochant du nœud puits.

b) Le protocole MR2

L'objectif principal du protocole "Maximally Radio-disjoint Multipath Routing protocol (MR2)" proposé par Maimour [67] est de fournir la bande passante nécessaire pour les applications multimédias via des chemins à lien-disjoints non interférents tout en augmentant la durée de vie du réseau. Pour atteindre ces objectifs, une approche incrémentale a été adoptée, dans laquelle tous les nœuds de capteurs sont dans l'état actif et la découverte de chemins est déclenchée par le nœud puits en envoyant un message de demande de chemins dont l'adresse (ID de chemin) est celle de la station de base. Lors de la réception d'un message de demande de chemin, un nœud de capteur crée une nouvelle entrée de chemin si l'ID du chemin rapporté n'apparaît pas dans sa table. De plus, si le message de demande de chemin provient directement de la station de base, alors l'ID du chemin de l'entrée est l'ID de ce nœud ; sinon, il utilise l'ID du chemin indiqué par la demande actuelle. Si l'ID du chemin rapporté est déjà stocké dans la table des chemins, l'entrée correspondante est remplacée si la demande actuelle fournit une meilleure qualité sinon la demande est ignorée. Une demande doit être rediffusée uniquement si elle induit une mise à jour de la table des chemins. Chaque fois que la source reçoit une demande, elle l'enregistre dans sa table des chemins. Lorsque tous les chemins de tous ses voisins actifs sont reçus, le nœud source sélectionne le meilleur chemin. Ensuite, il commence à transmettre les données via ce chemin sélectionné. De plus, lorsqu'un nœud reçoit un paquet de données à transmettre sur un chemin P donné, il positionne le drapeau "*inUse*" et envoie un message "*bePassive*" à ses voisins à l'exception de ses nœuds suivants et précédents appartenant au chemin P . Lors de la réception d'un message "*bePassive*", un nœud passe son état en mode passif. Cependant, en cas de congestion de chemin ou de manque de bande passante, le processus de formation de chemin supplémentaire est déclenché. Dans ce processus, les nœuds passifs ne réagissent pas aux demandes et ne participeront donc pas à la formation d'un chemin supplémentaire.

c) Le protocole BP-CMPR

Le protocole "Bandwidth-Power aware Cooperative Multi-Path Routing protocol (BP-CMPR)" [68] est basé sur un paradigme de communication coopératif. Les auteurs de ce protocole considèrent la qualité de service, la bande passante et l'efficacité énergétique pour sélectionner les chemins de routage. L'approche définit le problème de BP-CMPR et le considère comme NP-difficile qui peut être résolu par un algorithme heuristique en temps polynomial CMPR. Dans le protocole proposé, l'algorithme de Suurballe [69] est utilisé pour trouver k chemins à nœuds-disjoints de poids minimal de la source à la destination sur un graphe pondéré et la programmation dynamique est utilisée pour implémenter l'affectation de relais et l'allocation de puissance. L'approche comprend également un CMPR distribué (DCMPR) pour l'allocation de la puissance effective.

2.2.3 Efficacité énergétique

Les capteurs sans fil ont des ressources énergétiques limitées, par conséquent, l'utilisation de protocoles écoénergétiques pour ce type de dispositifs conduit à augmenter la durée de vie du réseau. De plus, les protocoles de routage sensible à l'énergie "Energy-Aware Routing protocol (EAR)" dans les RCMSFs promettent de minimiser la consommation

d'énergie dans tout le réseau puisqu'ils impliquent le meilleur chemin pour transmettre les données à la station de base, ce qui prolonge la durée de vie du réseau.

a) Le protocole REAR

Dans le protocole "Real time Energy Aware Routing protocol (REAR)" [70], les métadonnées sont utilisées dans la configuration du routage pour établir un routage multi-chemin afin de réduire la consommation d'énergie, tandis que l'algorithme de Dijkstra avancé et une fonction de coût sont utilisés pour prendre la décision de routage. Premièrement, l'algorithme de Dijkstra standard est utilisé pour sélectionner un lien avec le poids le plus bas parmi les nœuds marqués. Ce processus nécessite une analyse de tous les nœuds. Néanmoins, lorsqu'il y a un grand nombre de nœuds, le calcul peut prendre beaucoup de temps. Ainsi, l'algorithme de Dijkstra optimisé choisit les nœuds voisins via un mécanisme de consultation pour réduire le nombre de nœuds voisins dans un premier temps, et exclut les nœuds de liaison ayant une énergie restante insuffisante. Deuxièmement, l'algorithme de Dijkstra standard utilise un seul paramètre pour sélectionner un chemin, tandis que dans le processus de détermination de la qualité de service, plusieurs paramètres sont pris en considération tels que le délai, la bande passante, l'énergie restante, etc. De plus, l'algorithme de Dijkstra avancé implique ces paramètres pour calculer la fonction de coût comme indice d'évaluation complet pour évaluer la charge sur le lien de transmission.

b) Le protocole de routage multi-chemin à efficacité énergétique

Dans [71], un protocole de routage multi-chemin à efficacité énergétique (An energy-efficient multipath routing protocol) a été proposé pour les RCMSFs. Ce protocole de routage cherche à déterminer le chemin avec l'énergie minimum afin de ne pas épuiser rapidement l'énergie des nœuds et de ne pas augmenter le temps nécessaire pour déterminer un chemin alternatif. Il vise à fournir un environnement de transmission fiable avec une faible consommation d'énergie, en utilisant efficacement la disponibilité d'énergie et la force du signal reçu "Received Signal Strength Indicator (RSSI)" des nœuds pour identifier plusieurs chemins vers la destination. Dans la phase de découverte de chemin, le nœud puits diffuse le message de demande de chemin pour créer une table d'état des nœuds voisins qui doit conserver les adresses de tous les nœuds, qui sont capables de communiquer les données avec le nœud source. Au cours de ce processus, chaque nœud diffuse initialement le message de demande de chemin et maintient sa propre table de routage. Le nœud voisin qui a plus d'énergie et qui est plus éloigné de son précédent, est sélectionné comme saut suivant (noeud relais). Les nœuds qui ne sont pas sélectionnés dans ce processus passent en mode veille afin de conserver leur énergie. Dans ce protocole, les chemins sont établis uniquement lorsque cela est nécessaire, ce qui réduit la surcharge (l'overhead). Ce protocole permet également aux nœuds appartenant aux chemins d'agréger tous les paquets reçus pendant une courte période de temps.

c) Le protocole PEMuR

Les auteurs dans [72] ont proposé un protocole de routage multimédia économe en énergie "Power Efficient Multimedia Routing (PEMuR)". PEMuR est un système double

pour une communication vidéo efficace dans les RCMSFs basé sur l'utilisation combinée de modèles de routage hiérarchique et de planification de paquets vidéos. Ce protocole propose une technique de routage basée sur la qualité de service et également l'efficacité énergétique. Il permet de sélectionner les chemins les plus écoénergétiques et gère la charge du réseau en fonction de l'énergie restante des nœuds. Cela réduit les transmissions de données inutiles et par conséquent, l'efficacité énergétique est améliorée. Cependant, ce protocole peut être encore amélioré si le paramètre d'agrégation de bande passante est pris en considération.

d) Le protocole LEAR

Le protocole de routage "Load-based Energy Aware multimedia Routing protocol (LEAR)" [73] apporte des modifications au protocole "Ad hoc On Demand Distance Vector protocol (AODV)" [74]. Il est un protocole réactif, auto-organisé et économe en énergie ayant la capacité d'éviter les trous. Ce protocole de routage suppose que le réseau contient des capteurs scalaires et des capteurs multimédias. Lorsqu'un événement se produit, le nœud source envoie un message RREQ à ses nœuds voisins. Chaque nœud qui reçoit ce message à l'exception de la destination, le diffuse dans son voisinage. De plus, pour faire la distinction entre les données multimédias et les données scalaires, un bit est ajouté dans le message RREQ. Si le bit est mis à "1", ce sont des données multimédias sinon, il s'agit de données scalaires. Les données scalaires sont acheminées comme dans le protocole AODV. Cependant, les données multimédias doivent être acheminées de manière particulière car elles nécessitent plus de bande passante, d'énergie et d'espace mémoire. Lorsque le message RREQ arrive au nœud de destination, ce dernier envoie un message RREP au nœud source. Ainsi, le chemin est établi entre le nœud source et la station de base, et le nœud source transmet les paquets de données le long de ce chemin. Ce chemin est sélectionné parmi les chemins existants entre le nœud source et la destination en fonction de l'énergie.

e) Le protocole EA-TPGF

Le protocole "Energy-Aware TPGF (EA-TPGF)" [75] est une version améliorée du protocole "Two-Phase Geographical greedy Forwarding protocol (TPGF)" [76]. Le protocole TPGF implique la distance dans la sélection du prochain saut. Ainsi, s'il n'y a pas de changement dans la topologie, le protocole choisira toujours le même chemin lorsque la source et la destination sont fixes. Cela pourrait avoir un effet négatif sur les nœuds appartenant à ce chemin car ils consommeront rapidement leurs batteries et ainsi la durée de vie du réseau est minimisée. Pour surmonter cette limitation, EA-TPGF modifie la manière dont le protocole choisit les chemins, il prend en compte l'énergie résiduelle des nœuds dans le processus de sélection de chemin. Ce processus de sélection équilibre l'implication des nœuds dans le processus de routage et donc la durée de vie du réseau sera prolongée.

f) Le protocole MPRM

Le protocole "Multipath Routing Method for Supporting QoS and Improving Energy Efficiency in WMSNs (MPRM)" [77] prend en charge la QoS et améliore l'efficacité énergétique dans les RCMSFs. Ce protocole utilise une fonction du coût basée sur la priorité

des paquets, l'énergie restante des nœuds et la qualité de lien pour sélectionner les chemins où le nœud voisin avec le moindre coût est choisi comme saut suivant. La priorité du paquet est déterminée de deux manières : par l'application à l'origine du paquet ou par un champ prédéfini dans le paquet. Selon cette priorité, le paquet sera transmis plus ou moins rapidement. Cette priorité est marquée au niveau du nœud source pour définir le niveau de la QoS en fonction du modèle de trafic. En effet, le nœud source définit la valeur d'indicateur de la qualité du lien (LQI) avec les différents voisins qui peuvent agir comme prochains sauts et instaure une certaine priorité en fonction de la qualité de lien LQI pour sélectionner les prochains sauts.

2.2.4 Réduction de délai

Dans les réseaux sans fil à chemin unique, en cas de défaillance d'un chemin, un nouveau processus de découverte de chemin est déclenché pour garantir la continuité des services dans le réseau. Cela augmentera le délai de transmission. Cependant, ce délai peut être réduit dans les schémas de routage multi-chemin car d'autres chemins peuvent être utilisés lorsqu'une défaillance se produit sur le chemin principal.

a) Le protocole DCHT

Le protocole de routage "Delay-Constrained High Throughput protocol for multipath transmission (DCHT)" [78] vise à trouver plusieurs chemins disjoints avec un débit élevé et un faible délai de bout en bout. Dans ce protocole, la station de base arrête de mettre les messages exploratoires dans le pool des candidats lorsqu'elle reçoit un qui ne peut pas respecter l'échéance ou lorsque le temporisateur de découverte de chemins expire. Ensuite, elle trie les chemins candidats dans l'ordre croissant selon la métrique utilisée et sélectionne les premiers chemins ρ à renforcer, où $\lambda > \rho$ et λ est le nombre de chemins nécessaires au nœud source. En outre, le protocole DCHT doit trouver plus que le nombre requis de chemins car certains chemins candidats peuvent ne pas être renforcés si des nœuds disjoints ne peuvent pas être trouvés ou si le délai dépasse le délai limite. Si deux nœuds tentent de renforcer un lien qui converge vers le même nœud, le premier à renforcer gagnerait pour départager. De plus, les contraintes sur le délai doivent être respectées en calculant la différence entre deux horodatages locaux. Le protocole DCHT ne garantit pas seulement la détermination des chemins à nœuds-disjoints, mais il assure également que les chemins sont sans boucle puisque les boucles sont interrompues lors de la sélection du candidat suivant dans la table locale.

b) Le protocole AMPMCR

Le protocole "Adaptive Multi-Constraint Multipath Routing protocol (AMPMCR)" [79] vise à minimiser le taux de perte de paquets, la consommation d'énergie et aussi les délais. AMPMCR est basé sur une architecture en clusters dans laquelle le routage inter-cluster est effectué selon une fonction de coût pondéré. Cette fonction est basée sur trois paramètres : l'énergie résiduelle, le taux de perte de paquets, et le délai. Afin d'économiser l'énergie, les nœuds qui ne participent pas à l'opération de routage sont mis en mode veille. Dans le routage inter-cluster : initialement, un cluster est formé qui se compose de trois niveaux ; ces niveaux sont connectés les uns aux autres et le dernier niveau est connecté

au nœud puits. Dans chaque niveau, les clusters sont organisés avec un chef de cluster (CH) et des membres du cluster (CM). Un chemin principal est sélectionné pour effectuer le routage inter-cluster. Les CHs de chaque niveau sélectionnent leurs clusters de niveau supérieur selon la valeur retournée par la fonction de coût. Les CHs de chaque niveau diffusent leurs interfaces pour savoir que le CH satisfait la fonction de coût. Le lien qui relie les canaux des couches adjacentes avec un délai minimum, un taux de perte minimum et une énergie maximum est sélectionné pour la transmission de données et le processus se poursuit de la couche inférieure à la couche supérieure jusqu'à ce qu'elle atteigne le nœud puits. Ainsi, le chemin reliant le CH de chaque couche et le nœud puits est choisi selon la valeur de la fonction de coût (le chemin ayant la meilleure valeur) et les données sont transférées par ce chemin. Cependant, dans le routage multi-chemin, le protocole AMPMCR utilise des tables de chemins au niveau des nœuds et le nœud puits inonde le réseau avec plusieurs demandes de chemins.

2.2.5 Fiabilité de données

Le routage multi-chemin peut garantir une livraison fiable des données. Cela peut être réalisé en générant plusieurs copies du même paquet et en envoyant chaque copie via un chemin différent. Ainsi, avec ces données redondantes, la probabilité est suffisamment grande pour qu'au moins une copie du paquet arrive à destination avec succès.

a) Le protocole MHDMwTS

Le protocole "Minimum Hop Disjoint Multipath routing algorithm with Time Slice load balancing congestion control scheme (MHDMwTS)" [80] est un protocole de routage multi-chemin entièrement disjoint ; il considère que plusieurs sources doivent construire des chemins vers le nœud puits et auront des nœuds communs entre différentes sources. Trois chemins seront créés pour chaque source : le chemin principal, le chemin alternatif et le chemin de sauvegarde. Ce protocole de routage est réalisé en deux phases : la construction de chemins et la reconnaissance de chemins. Dans la première phase, lorsqu'un nœud est activé, il enverra le paquet de demande de construction de chemins à ses voisins qui ont le plus petit nombre de sauts vers le nœud puits. Chaque voisin qui reçoit le paquet de demande, ajoute son ID dans le paquet ainsi que l'horodatage du nœud expéditeur, puis l'envoie à ses voisins qui ont les plus petits nombres de sauts vers le nœud puits. Ce processus est répété jusqu'à ce que le paquet de demande atteigne le nœud puits. Le premier paquet qui atteint le nœud puits est celui dont le délai est le plus petit, donc l'ensemble des nœuds qui ont envoyé ce paquet de demande représente le chemin principal. Ainsi, lorsqu'un autre paquet arrive, les nœuds y sont comparés à ceux du chemin principal. S'il existe au moins un nœud commun entre les deux paquets de demande de chemin, le paquet sera rejeté, sinon tous les nœuds du second paquet de demande de chemin forment le chemin alternatif. De manière analogue, la recherche du chemin de sauvegarde est effectuée jusqu'à ce que le chemin soit trouvé ou le délai expire et dans le second cas, la recherche de chemin sera arrêtée. Dans la deuxième phase, le nœud puits doit renvoyer un paquet d'accusé de réception (ACK) aux nœuds sources. Le paquet ACK qui contient les informations sur le chemin trouvé, y compris les nœuds et les informations de temps associées, sera transmis à travers les nœuds du chemin et marquera les nœuds utilisés. Chaque nœud appartenant au chemin doit maintenir une table après avoir reçu le

message ACK. Après la construction des chemins, chaque source a deux chemins en cours d'utilisation : le chemin principal et le chemin alternatif. Une fois que le paquet ACK est reçu par le noeud puits, la source commence à transmettre des données via le chemin principal. Après avoir utilisé la tranche de temps d'un chemin, le noeud puits change le chemin de transmission par un autre chemin.

b) Le protocole QMOR

L'objectif principal de protocole "QoS-aware Multi-sink Opportunistic Routing protocol (QMOR)" [81] est de fournir efficacement des données multimédias sous des contraintes de QoS dans les RCMSFs. Le protocole QMOR sélectionne et hiérarchise la liste des chemins pour obtenir une livraison économe en énergie des données vidéos sous des contraintes de QoS. Premièrement, le protocole QMOR discute la manière pour réduire efficacement la redondance du trafic multimédia en utilisant un codage différentiel et en tirant parti des avantages de plusieurs noeuds puits. Ensuite, il se concentre sur la sélection et la priorisation des chemins de telle sorte que l'efficacité de la transmission puisse être améliorée. Enfin, les opérations multi-puits sont intégrées dans un cadre de routage opportuniste afin de minimiser la consommation d'énergie et de répondre aux contraintes de délai et de fiabilité. QMOR réalise une amélioration significative des performances, en termes de consommation d'énergie, de délai et de fiabilité.

2.3 Récapitulatif sur les protocoles de routage multi-chemin conçus pour les RCMSFs

Le tableau 2.1 présente la comparaison de divers protocoles de routage multi-chemin dans les RCMSFs en fonction de plusieurs critères : architecture, contournement de trou, disjonction de chemins, équilibrage de charge, agrégation de bande passante, efficacité énergétique, réduction de délai et fiabilité de livraison de données.

TABLE 2.1 – Récapitulatif sur les protocoles de routage multi-chemin conçus pour les RCMSFs

Protocole	Architecture	Contournement de trou	Disjonction des chemins	Équilibrage de charge	Agrégation de bande passante	Efficacité énergétique	Délai	Fiabilité
REAR [70] (2007)	Plat	Non	/	Non	Non	Oui	Oui	Non
DGR [66] (2007)	Géographique	Non	à nœuds-disjoints	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
TinyONDMR [6] (2008)	Plat	Non	à nœuds-disjoints	Oui	Non	Non	Non	Oui
MR2 [67] (2008)	Plat	Non	à liens-disjoints	Non	Oui	Oui	Non	Non
DCHT [78] (2008)	Plat	Non	à nœuds-disjoints	Non	Oui	Oui	Oui	Non
LBHR [63] (2010)	Hierarchique	Non	/	Oui	Non	Oui	Oui	Non
MHDMwTS [80] (2011)	Plat	Non	Entièrement disjoint	Oui	Non	Oui	Non	Oui
LEAR [73] (2011)	Plat	Oui	Entièrement ou partiellement disjoint	Non	Non	Oui	Non	Non
PEMuR [72] (2011)	Hierarchique	Non	/	Oui	Non	Oui	Non	Non
AGEM [7, 8] (2012)	Géographique	Oui	/	Oui	Non	Oui	Oui	Non
AMPuCR [79] (2012)	Hierarchique	Non	/	Non	Non	Oui	Oui	Non
BP-CMPR [68] (2012)	Plat	Non	à nœuds-disjoints	Non	Oui	Oui	Non	Non
EA-TPGF [75] (2013)	Géographique	Non	/	Non	Non	Oui	Non	Non
GEAM [65] (2013)	Géographique	Oui	à liens-disjoints	Oui	Non	Oui	Non	Oui
MPRM [77] (2014)	Plat	Non	/	Non	Non	Oui	Oui	Oui
QMOR [81] (2014)	Géographique	Non	/	Non	Non	Oui	Oui	Oui

2.4 Classification des protocoles de routage géographique multi-chemin dans les RCMSFs

Le routage géographique permet une transmission efficace des données multimédias dans les RCMSFs. Cette technique de routage transmet des paquets entre une paire de noeuds (noeud source et noeud puits) en fonction des positions géographiques des noeuds. Le routage géographique élimine le besoin pour les noeuds de stocker et de partager des informations de topologie (stocker uniquement des informations sur le voisinage à un saut), ce qui permet de réduire les coûts de partage d'informations et éviter la possibilité d'utiliser des informations obsolètes dans une décision de routage. De plus, cette technique de routage ne nécessite pas les liaisons de bout en bout. Ainsi, au lieu de tenter de construire et de suivre une liaison uniquement statique de la source à la station de base, les décisions de routage sont prises saut par saut. Par conséquent, en plus d'éviter la nécessité d'une maintenance topologique coûteuse, le routage géographique élimine l'utilisation de messages de demande de chemins coûteux. Tous ces avantages conviennent aux RCMSFs à grande échelle et à faible consommation d'énergie. De nombreux protocoles de routage géographique multi-chemin pour les RCMSFs ont été proposés dans la littérature. Notre objectif dans cette section est d'étudier les différents protocoles de routage géographique multi-chemin pour la transmission de données multimédias dans les RCMSFs et proposer une nouvelle classification pour ces protocoles comme c'est illustré dans la figure 2.8. Cette section comprend un bref aperçu de ces protocoles de routage :

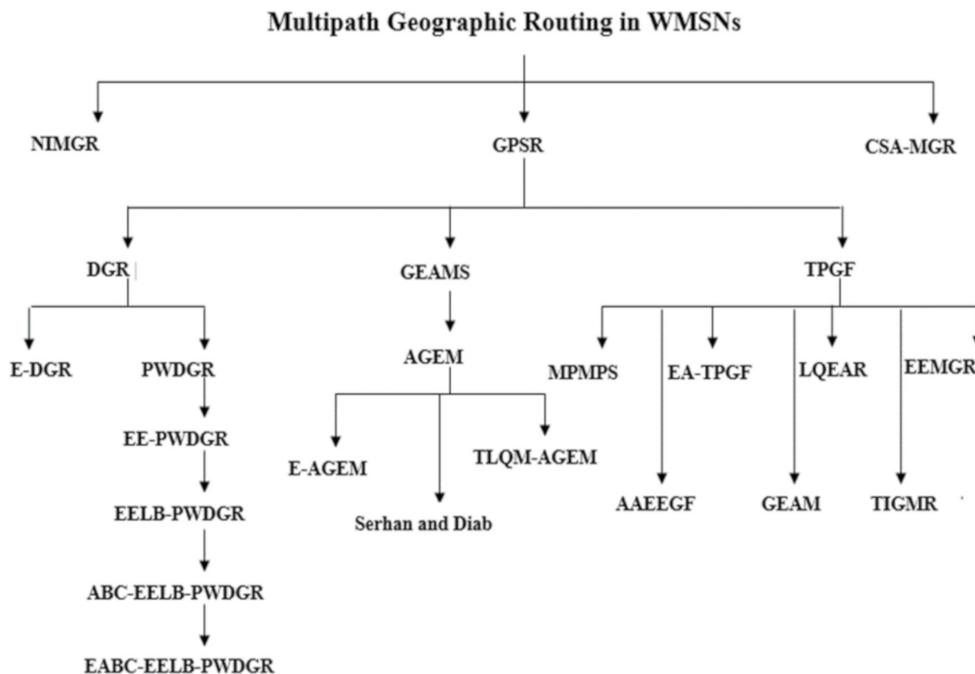


FIGURE 2.8 – Protocoles de routage géographique multi-chemin dans les RCMSFs

Le protocole de routage "GPSR" [52] utilise deux modes différents pour le routage des données : la transmission gloutonne et la transmission de périmètre. Ce protocole utilise des décisions de transfert glouton. Ainsi, lors du processus de routage lorsqu'un noeud relais reçoit un paquet de données, il choisit le voisin le plus proche de la station de base

comme nœud relais (prochain saut) pour relayer le paquet. Dans le cas où un tel nœud ne peut pas être trouvé, cette situation est appelée "trou de routage" ou "zone vide" qui peut se produire en raison de la présence d'obstacles, la mobilité des nœuds, etc. Dans ce cas, GPSR bascule vers la stratégie de transmission de périmètre en exécutant la règle de la main droite pour faire passer le paquet autour du trou.

Le protocole de routage "TPGF" [76] a été l'un des premiers protocoles avec le concept de routage multi-chemin dans les RCMSFs. Ce protocole comporte deux phases : l'établissement des chemins géographiques et l'optimisation des chemins. La première phase explore les chemins de routage possibles avec un concept de contournement de trous en utilisant deux stratégies : une stratégie de transmission gloutonne et une stratégie de recul et de marquage. Dans la première stratégie, le nœud source actuel sélectionne le nœud suivant (prochain saut) parmi ses voisins à un saut dans la direction de la station de base en fonction de la distance qui le sépare de cette dernière. La deuxième stratégie est exécutée si un nœud n'a pas de nœud suivant à l'exception de son nœud précédent, dans ce cas ce nœud se marquera comme un nœud bloqué et le nœud précédent tentera de trouver un autre nœud disponible dans la direction de la station de base. Après l'exploration des chemins possibles vers la station de base, TPGF sélectionne le chemin avec le moins de nœuds (moins de sauts vers la station de base) et supprime tous les chemins présentant des boucles de routage. Par conséquent, ce protocole effectue à plusieurs reprises pour trouver plus de chemins à nœuds-disjoints.

Le protocole "Multi-Priority Multi-Path Selection (MPMPS)" [82] est une extension du protocole TPGF [76] pour prouver que chaque chemin trouvé par TPGF ne convient pas à la transmission vidéo, car un chemin long avec un délai élevé peut ne pas satisfaire les exigences de la QoS en terme de délai pour la transmission multimédia. Le protocole MPMPS utilise un routage géographique multi-chemin pour explorer le nombre maximal de chemins à nœuds-disjoints entre le nœud source et la station de base. De plus, un algorithme de sélection multi-chemin sensible au contexte dans la couche de transport est exécuté pour sélectionner le nombre maximum de chemins à partir de tous les chemins à nœuds-disjoints trouvés pour maximiser la livraison des données à la station de base. Le protocole MPMPS apporte deux contributions : la première prend en charge plusieurs priorités en faisant la distinction entre l'image, le flux audio, et la vidéo ; et la deuxième contribution consiste à choisir le nombre maximum de chemins pour maximiser le débit de la livraison de données.

Le protocole "Application Aware Energy Efficient Geographic Greedy Forwarding (AAEEGF)" [83] est une autre amélioration du protocole TPGF. Il est divisé en deux phases où la première phase explore le nombre maximal de chemins à nœuds-disjoints et la seconde améliore la durée de vie des chemins trouvés dans la première phase. La première phase se déroule en deux sous-phases : la recherche de chemins à nœuds-disjoints et l'optimisation des chemins. Lors de la sous-phase de la recherche de chemins à nœuds-disjoints, un schéma de transmission gloutonne est utilisé pour sélectionner le nœud le plus proche de la station de base comme nœud relais parmi tous ses nœuds voisins tandis que la seconde sous-phase permet de trouver des chemins de routage avec le moins de sauts.

Le protocole "EA-TPGF" proposé dans [75] est une autre extension du protocole TPGF. EA-TPGF est un protocole géographique multi-chemin (déjà mentionné dans la section e)).

De même le protocole "GEAM" [65] est considéré aussi comme un protocole de routage géographique multi-chemin dont la description a été déjà faite dans la section e). Le protocole GEAM ne permet pas de garantir les métriques QoS pour tous les chemins dérivés.

Le protocole "Link Quality and Energy-Aware Routing protocol (LQEAR)" [84] sélectionne plusieurs chemins de routage à nœuds-disjoints qui améliorent la durée de vie du réseau. Le saut suivant est choisi en fonction de l'indicateur de qualité de lien "LQI", de la distance entre les voisins directs et la station de base et de l'énergie restante des nœuds voisins. Ce protocole choisit les liens de meilleure qualité pour offrir une fiabilité et la qualité de ces liens est évaluée par la métrique LQI. Cependant, la métrique LQI ne parvient pas à évaluer la qualité des liens avec précision et ne fournit ainsi que des caractéristiques partielles de ces liens.

Le protocole "Triangle link quality metric and minimum inter-path Interference based Geographic Multipath Routing protocol (TIGMR)" [85] est un protocole de routage géographique multi-chemin dont le fonctionnement est quasiment similaire à celui du protocole TPGF. TIGMR découvre les chemins de routage à nœuds-disjoints dans les réseaux supportant la technologie IEEE 802.15.4. Il sélectionne le saut suivant en se basant sur une métrique de qualité de lien triangulaire, la distance par rapport à la station de base et l'énergie restante des nœuds, tout en anticipant un effet minimum d'interférences des chemins adjacents. Ce protocole évite le problème de nœud caché "Hidden Node Problem (HNP)" au nœud de la station de base sans utiliser le mécanisme "Request-To-Send/Clear-To-Send (RTS/CTS)".

Le protocole "Energy and ETX aware Multipath Geographic Routing protocol (EEMGR)" a été proposé dans [86]. Ce protocole de routage découvre les chemins ayant des liens de communication de haute qualité. Il détermine les chemins à nœuds-disjoints optimaux pour transmettre les données multimédias du nœud source à la station de base. Il utilise une fonction "coût" basée sur la distance entre les voisins directs et la station de base, l'énergie restante et la métrique de qualité de lien "ETX" pour choisir le saut suivant. La valeur ETX fournit les caractéristiques de qualité de lien requises et estime avec précision la qualité du lien. L'évaluation du protocole EEMGR a montré qu'il prolonge la durée de vie du réseau par rapport aux protocoles de routage auxquels il a été comparé.

Le protocole "DGR" [66] est considéré aussi comme un protocole géographique multi-chemin. C'est une extension du protocole GPSR [52]. Son grand inconvénient est qu'il ne permet pas l'équilibrage de charge à proximité de la station de base. Dans ce contexte et pour remédier à cette limitation, les auteurs dans [87] ont proposé une extension de ce protocole appelé "Enhanced Directional Geographical Routing protocol (E-DGR)". Dans E-DGR, la construction des chemins est réalisée en trois phases : phase d'expansion, phase parallèle et phase de convergence. L'algorithme d'ajustement de l'angle de déviation et l'algorithme de détection sont tous deux introduits pour configurer plusieurs chemins disjoints. Ce protocole de routage peut permettre de répartir spatialement plusieurs chemins uniformément à proximité de la station de base. Par conséquent, la durée de vie du réseau peut être améliorée grâce à la fonction d'équilibrage de charge entre des chemins à proximité de la station de base.

Le protocole "Pair-Wise Directional Geographical Routing protocol (PWDGR)" a été proposé dans [88]. Ce protocole a été conçu pour résoudre le problème de goulot d'étranglement énergétique autour de la station de base. PWDGR est une version améliorée du

protocole DGR [66]. Il trouve des nœuds par paires comme nœuds de destination dans la portée à 360 degrés de la station de base. Dans ce protocole, les voisins du nœud source transmettent d'abord les données aux nœuds par paires autour de la station de base en utilisant l'algorithme DGR, puis transmettent les données à la station de base par l'algorithme GPSR. Afin de prolonger la durée de vie du réseau, tous les nœuds par paire sont utilisés. PWDGR permet un équilibrage de charge, une agrégation rapide de la bande passante et une meilleure qualité vidéo à la destination. En outre, le schéma de routage dans GPSR ne prend en compte que le paramètre de distance pour sélectionner les nœuds de manière gloutonne. A cet effet, les conditions de surcharge qui se produisent dans un schéma de routage multi-chemin ne sont pas efficacement gérées d'où l'apport du protocole PWDGR a été bien illustré en le comparant au protocole GPSR.

Le protocole "Energy Enhanced Pair-Wise Directional Geographical Routing protocol (EE-PWDGR)" [89] est une amélioration du protocole PWDGR. Dans EE-PWDGR, une approche de clustering basée sur la distance est utilisée pour collecter les coordonnées locales à l'aide desquelles une matrice de transformation est construite. Puis, un système de coordonnées global est obtenu par la combinaison des deux systèmes de coordonnées cartésiens des clusters. Ce schéma de routage utilise un système de localisation basé sur la triangulation. Le protocole EE-PWDGR transmet les données multimédias du nœud source par paire au nœud de destination en utilisant une version améliorée de GPSR qui sélectionne le saut suivant en fonction de distance et du taux d'épuisement de l'énergie. En mode périmètre de GPSR, le saut suivant est choisi en fonction de l'angle de vue et le taux d'épuisement de l'énergie.

Le protocole "Energy Enhanced Load Balancing PWDGR protocol (EELB-PWDGR)" [89] est une autre amélioration du protocole PWDGR, dans lequel le même processus de routage du protocole EE-PWDGR est exécuté sauf pour les paramètres de QoS et l'utilisation de la logique floue basée sur des décisions pour garantir l'équilibrage de charge. Les chemins de routage appropriés sont sélectionnés en fonction de la distance, du taux d'épuisement de l'énergie, de délai moyen, de la fiabilité du chemin et de la qualité de lien. Les paramètres de QoS sont calculés pour tous les chemins, puis la logique floue est générée pour chaque paramètre et utilisée pour déterminer la priorité pour la sélection des chemins. Le chemin de routage avec la valeur de coût la plus élevée est attribué au paquet multimédia hautement prioritaire. Ceci permet de résoudre le problème de consommation d'énergie et d'équilibrage de charge.

Le protocole "Artificial Bee Colony Based EELB-PWDGR protocol (ABC-EELB-PWDGR)" [90] est une extension du protocole EELB-PWDGR. Dans ce protocole, les mêmes étapes de traitement que dans le protocole EELB-PWDGR sont utilisées, la différence majeure étant le mécanisme de sélection des chemins. Dans ABC-EELB-PWDGR, la métaheuristique "colonie d'abeilles artificielle (ABC)" est appliquée pour sélectionner le chemin de routage optimal qui répond aux contraintes de QoS. Ce protocole surpasse EELB-PWDGR mais l'algorithme ABC présente des performances insatisfaisantes avec une faible diversité de la population et une vitesse de recherche plus faible.

Le protocole "Enhanced ABC based EELB-PWDGR protocol (EABC-EELB-PWDGR)" [90] est une amélioration du protocole ABC-EELB-PWDGR. EABC-EELB-PWDGR utilise deux nouvelles équations de recherche des solutions afin de réduire la latence. Il exécute la méthode de recherche chaotique et le mécanisme d'apprentissage basé sur l'opposition dans l'initialisation de la population pour équilibrer la diversité et la capacité de conver-

gence de la métaheuristique ABC. Le chemin de routage optimal est choisi en fonction des deux nouvelles équations de recherche des solutions et les chemins sont comparés à des fins de classement, en fonction de la priorité dans un temps de recherche moindre.

Dans [91], Medjiah et al. ont proposé un protocole géographique multi-chemin pour les RCMSFs, appelé "GEAMS". GEAMS gère les données de streaming multimédias en maintenant à la fois la restriction de la QoS et l'efficacité énergétique. Il implique le concept d'équilibrage de charge pour augmenter la durée de vie du réseau et réduire la taille de la file d'attente. Il utilise deux modes de routage : routage glouton intelligent et routage en marche arrière. Le premier mode est exécuté lorsqu'il y a toujours un voisin plus proche de la station de base que le nœud actuel, tandis que le deuxième mode est utilisé pour traiter une situation de blocage, dans laquelle le nœud transmetteur ne peut pas trouver un saut suivant vers la station de base.

Dans [92], Serhan et Diab ont proposé une version améliorée du protocole AGEM, appelée "Energy-Efficiency QoS routing scheme". Ce protocole sélectionne le prochain saut en fonction des mêmes métriques utilisées par le protocole AGEM en plus de la priorité du trafic. La priorité du trafic se distingue par différentes couleurs (rouge, vert et jaune), et elle est calculée pour chaque nœud en se basant sur l'énergie résiduelle des nœuds voisins, la distance et la qualité du lien. Ce protocole utilise différentes fonctions de coût pour déterminer la priorité du type de paquet, et ces paquets sont acheminés via différents chemins.

Le protocole "Energy-Efficient and QoS-Aware Multipath Geographic Routing protocol (E-AGEM)" [93] est une amélioration du protocole AGEM. Dans ce protocole, trois améliorations à AGEM sont présentées. Premièrement, le mécanisme de routage a été modifié pour étendre une plage angulaire plus large pour la construction des chemins. Deuxièmement, la distance vers la station de base et l'angle de vue sont ajoutés en tant que mesures dans la fonction "coût de routage". Troisièmement, AGEM a été modifié pour prendre en charge différents types de trafic avec différentes exigences de QoS. E-AGEM permet la découverte d'un plus grand nombre de chemins par rapport au protocole AGEM.

Le protocole "TLQM-AGEM" [94] est une version améliorée du protocole AGEM. Ce protocole découvre plusieurs chemins de routage disjoints en fonction d'une métrique de qualité de lien triangulaire, de la distance et de l'énergie restante. La métrique de qualité de lien triangulaire utilisée dans le protocole TLQM-AGEM est calculée sur la base des valeurs "LQI", "SNR" et "PRR". TLQM-AGEM améliore la durée de vie du réseau et optimise les performances globales par rapport aux protocoles GEAMS [91] et AGEM [8].

Le protocole "Non-Interfering Multipath Geographic Routing protocol (NIMGR)" [60] résout le problème de chemins multiples interférents dans les RCMSFs. NIMGR construit deux chemins de routage non interférents avec un nombre de sauts moyen plu petit où chaque nœud sur un chemin a une distance d'au moins de deux portées de transmission des autres nœuds sur l'autre chemin. Ce protocole génère un angle de déviation et le nœud source achemine les paquets le long des deux chemins de routage s'écartant de la ligne droite entre le nœud source et la station de base. NIMGR réduit le délai de bout en bout moyen, néanmoins il ne prend pas en considération l'énergie restante des nœuds.

Dans [61], Bennis et al. ont proposé le protocole "Carrier Sense Aware Multipath Geographic Routing protocol (CSA-MGR)". CSA-MGR fournit un véritable multi-chemin non interférent en utilisant le concept de détection de porteuse. Il détermine plusieurs chemins disjoints en évitant toute plage de détection de porteuse partagée en utilisant un

mécanisme dynamique et distribué pour gérer les effets des interférences entre les chemins. Dans CSA-MGR, le mécanisme d'évitement de zigzag et le calcul du nombre de voisins communs (NCN) sont utilisés pour garantir un processus de découverte de chemins plus efficace et plus rapide. Ce protocole a été conçu à des fins de trafic élevé, en particulier lorsque le chemin unique a de mauvaises performances et que le besoin d'un deuxième chemin est nécessaire pour garantir de bonnes performances de routage.

Les protocoles de routage présentés dans cette section, ont été brièvement résumés dans le tableau 2.2 en mettant l'accent sur les caractéristiques suivantes : l'approche utilisée, disjonction des chemins, contournement des trous, métriques pour la sélection des chemins, et performances.

TABLE 2.2 – Récapitulatif sur les protocoles de routage géographique et multi-chemin dans les RCMSFs

Protocole	Approche utilisée	Disjonction de chemins	Contournement des trous	Métriques pour la sélection des chemins	Performances
GPSR [52] (2000)	Routage glouton et routage de périmètre	/	Oui	Distance	Surpasse DSR [95]
DGR [66] (2007)	Correction d'erreur directe et réglage de l'angle de déviation	à nœuds-disjoints	Non	Angle de référence de déviation	Surpasse GPSR [52] et EA-TPGF [75]
MPMPS [82] (2008)	Algorithme TPGF	à nœuds-disjoints	Non	Distance	Surpasse TPGF [76]
GEAMS [91] (2009)	Routage glouton intelligent et routage en marche arrière	/	Oui	Énergie restante, nombre de saut, distance et historique du flux actuel	Surpasse GPSR [52]
NIMGR [60] (2009)	Algorithme DGR	/	Non	Distance et angle de déviation	Surpasse GPSR [52]
TPGF [76] (2010)	Routage glouton, Reculer et marquer et Optimisation basé sur l'étiquette	à nœuds-disjoints	Oui	Distance	Surpasse GPSR [52]
E-DGR [87] (2012)	Algorithme de détection et Réglage de l'angle de déviation	à nœuds-disjoints	Non	Nombre de sauts, distance et Angle de référence de déviation	Surpasse DGR [66]
AAEEGF [83] (2012)	Routage glouton, retour en arrière et marque libre et Optimisation basé sur l'étiquette	à nœuds-disjoints	Oui	Distance et délai	Surpasse TPGF [76]
AGEM [7,8] (2012)	Routage glouton intelligent et Routage en marche arrière	/	Oui	Énergie restante, nombre de saut, distance et historique du flux actuel	Surpasse GEAMS [91]
EA-TPGF [75] (2013)	Routage glouton, Reculer et marquer et Optimisation basé sur l'étiquette	à nœuds-disjoints	Oui	Distance et énergie restante	Surpasse TPGF [76]
GEAM [65] (2013)	Ajustement de district	à liens-disjoints	Oui	Énergie restante et portée de transmission	Surpasse GPSR [52] et TPGF [76]
PWDGR [88] (2015)	Algorithme DGR et Algorithme GPSR	à nœuds-disjoints	Non	Nombre de sauts, distance, angle du contrat de chemin et angle inclus	Surpasse DGR [66]
Serhan and Diab [92] (2015)	Routage glouton intelligent et routage en marche arrière	/	Oui	Énergie restante, nombre de sauts, distance, historique du flux actuel, priorité du trafic et qualité du lien	Surpasse AGEM [7,8]

CSA-MGR [61] (2015)	Routage glouton et métrique de nombre de voisins communs	Chemins disjoints	Non	Distance	Surpasse TPGF [76]
LQEAR [84] (2017)	Algorithme TPGF	à nœuds-disjoints	Non	Distance, énergie restante et qualité du lien	Surpasse TPGF [76] et EA-TPGF [75]
TIGMR [85] (2018)	Algorithme TPGF	à nœuds-disjoints	Non	Métrique de qualité du lien triangulaire, énergie restante et distance	Surpasse TPGF [76] et LQEAR [84]
EE-PWDGR [89] (2017)	Version inspirée de GPSR et système de localisation basé sur la triangulation	à nœuds-disjoints	Non	Taux d'épuisement d'énergie, distance	Surpasse PWDGR [88]
EELB-PWDGR [89] (2017)	Version prouvée de GPSR, Système de localisation basé sur la triangulation et Logique floue	à nœuds-disjoints	Non	Taux d'épuisement d'énergie, distance, fiabilité de chemin, qualité du lien, délai moyen et angle de correction	Surpasse PWDGR [88]
EEMGR [86] (2018)	Algorithme TPGF	à nœuds-disjoints	Non	Distance, énergie restante et la valeur ETX	Surpasse TPGF [76] et EA-TPGF [75]
ABC-EELB-PWDGR [90] (2018)	Algorithmes EELB-PWDGR et ABC	à nœuds-disjoints	Non	Taux d'épuisement d'énergie, distance, fiabilité du chemin, qualité du lien, délai moyen et angle de déviation	Surpasse EELB-PWDGR [89]
EABC-EELB-PWDGR [90] (2018)	Algorithme ABC-EELB-PWDGR, Méthode de recherche chaotique et mécanisme d'apprentissage basé sur l'opposition	à nœuds-disjoints	Non	Taux d'épuisement d'énergie, distance, fiabilité du chemin, qualité du lien, délai moyen et angle de déviation	Surpasse ABC-EELB-PWDGR [90]
E-AGEM [93] (2018)	Routage glouton intelligent et routage en marche arrière	/	Oui	Énergie restante, nombre de sauts, distance, historique du flux actuel, priorité du trafic, qualité du lien et angle de vue	Surpasse AGEM [7,8]
TLQM-AGEM [94] (2020)	Routage glouton intelligent et routage en marche arrière	à nœuds-disjoints	Oui	Énergie restante, nombre de sauts, distance, historique du flux actuel, priorité du trafic et métrique triangulaire de qualité du lien	Surpasse AGEM [7,8]

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes classes des solutions de routage multi-chemin dédiés aux RCMSFs ont été passées en revue et une comparaison entre ces solutions a été établie en fonction de plusieurs critères de performances. En outre, une deuxième classification a été présentée à propos des protocoles de routage géographique multi-chemin proposés dans la littérature destinés aux RCMSFs, suivie d'une comparaison entre ces protocoles selon plusieurs métriques de performances. Cette synthèse nous a permis d'esquisser les lignes essentielles pour proposer une solution de routage multi-chemin efficace qui prend en compte les limitations des RCMSFs, répond aux exigences des flux multimédias et garantir un certain niveau de la QoS.

Le chapitre suivant est consacré pour présenter nos contributions liées aux solutions de routage géographique multi-chemin dans les RCMSFs. A cet effet, nous mettons l'accent sur les travaux connexes ; ensuite, nous détaillons les conceptions proposées, et les différentes phases opérationnelles. Enfin, nous discutons les résultats de simulation obtenus.

Chapitre 3

**Routage géographique multi-chemin
à nœuds-disjoints pour les RCMSFs**

Chapitre 3

Routage géographique multi-chemin à nœuds-disjoints pour les RCMSFs

3.1 Introduction

Poussés par leur supériorité en termes de fourniture de données vidéo et audio, les RCMSFs amélioreront non seulement les applications existantes dans les RCSFs, mais ils permettront également une nouvelle large gamme d'applications pour les séquences vidéos accélérées ou courtes telles que la surveillance multimédia, la surveillance environnementale, les maisons intelligentes, le système de gestion du trafic, l'assistance automatisée, le contrôle des processus industriels, etc. Ces types d'applications nécessitent des fonctionnalités supplémentaires par rapport aux applications traditionnelles telles que la demande élevée de bande passante, le faible taux de perte de paquets, le délai réduit, la fiabilité des données, la gigue acceptable, tandis que les nœuds de capteurs multimédias sont des dispositifs limités en termes d'énergie, de mémoire et de capacités de traitement. Ainsi, ces exigences avec ces dispositifs aux ressources limitées ont fait de la livraison de données un véritable défi pour les RCMSFs. D'une part, les données multimédias se caractérisent par leur grande taille, qui nécessitent plus d'énergie pour être acheminées vers une station de base distante et d'autre part, la qualité de service (QoS) est devenue une exigence fondamentale pour ce type de réseaux. Par conséquent, les schémas de routage dans les RCMSFs devraient garantir la qualité du service et l'efficacité énergétique pour assurer la fiabilité de la livraison des données et une longue durée de vie des réseaux.

Dans ce contexte, de nombreuses techniques de routage introduisant l'efficacité énergétique et la qualité de service dans les RCMSFs ont été proposées dans la littérature [96–98]. Vu que les RCMSFs produisent une grande quantité de données, la transmission de ces données via un seul chemin ne peut pas satisfaire les besoins de nombreuses applications en termes de latence et d'équilibrage de charge. Par conséquent, l'utilisation de protocoles de routage multi-chemin est devenue une nécessité pour répondre à ces besoins car elle leur permet d'impliquer plusieurs chemins pour transférer des données d'un nœud source à un nœud de destination (la station de base). Il existe trois types de routage basés sur la structure de réseau : le routage plat, routage hiérarchique et le routage basé sur la localisation (géographique). La décision d'acheminement dans le routage géographique est prise localement en fonction de la localisation géographique des nœuds. Ce type de routage est le plus adapté aux données multimédias caractérisées par une grande masse de données

grâce à ces différents avantages qui conviennent aux RCMSFs. Le routage géographique réduit les coûts de partage d'informations et réduit également la possibilité d'utiliser des informations obsolètes dans une décision de routage puisqu'il élimine le besoin pour les nœuds de stocker et de partager des informations de topologie. De plus, les liaisons de bout en bout ne sont pas nécessaires dans cette stratégie de routage, au lieu de tenter de construire et de suivre une liaison uniquement statique du nœud source au nœud puits, les décisions de routage sont prises saut par saut. Par conséquent, en plus d'éviter la nécessité d'une maintenance topologique coûteuse, le routage géographique élimine l'utilisation de paquets de demande de chemin.

Dans ce chapitre, nous proposons deux contributions relatives au routage géographique multi-chemin pour les RCMSFs. Ces deux contributions présentent des améliorations de deux protocoles géographiques conçus pour les RCMSFs. La première amélioration c'est une version multi-chemin du protocole mono-chemin GPSR pour transmettre les flux multimédias, appelée "MMGPSR", tandis que la deuxième amélioration concerne le protocole multi-chemin AGEM où une métrique de qualité de lien est ajoutée pour garantir la transmission fiable des paquets. Le deuxième protocole proposé est appelé "TLQM-AGEM".

3.2 Contexte

Contrairement aux RCSFs où les solutions de routage ont été proposées afin de prolonger la durée de vie des réseaux en minimisant la quantité d'énergie consommée, le but principal de la conception des schémas de routage dans les RCMSFs est d'optimiser la livraison des flux multimédias avec des niveaux de QoS prédéterminés en plusieurs termes tels que : la fiabilité, le délai, la bande passante et l'énergie. A cet effet, nous avons proposé deux améliorations de deux protocoles proposés dans la littérature destinés au routage géographique pour les RCSFs.

La première amélioration concerne le protocole mono-chemin "GPSR" [52] qui a montré de bonnes performances en termes de délai de transmission puisqu'il sélectionne le chemin avec le plus petit nombre de sauts. Cependant, ce protocole de routage ne supporte pas l'équilibrage de charge entre l'ensemble de nœuds du réseau ce qui implique la surutilisation des nœuds impliqués dans le chemin du routage, et par conséquent le taux de paquets perdus est augmenté et la durée de vie des réseaux est diminuée. De ce fait, afin d'améliorer les performances de GPSR, nous avons proposé une solution de routage qui vise à réduire le taux de paquets perdus et prolonger la durée de vie des réseaux.

Comme mentionné dans le chapitre 2, plusieurs améliorations de "AGEM" [7] ont été proposées dans la littérature, mais ces solutions de routage ne prennent pas en considération la qualité du lien lors de la sélection des chemins pour transmettre les flux de données. Dans ce contexte nous avons proposé une amélioration de ce protocole géographique multi-chemin pour les RCMSFs. Ce protocole a montré de bons résultats en termes de taux de perte de paquets et de délai de transmission. Néanmoins, AGEM construit des chemins non-disjoints qui peuvent provoquer la congestion au niveau des nœuds partagés entre les chemins et donc une perte élevée de paquets. En plus ce protocole sélectionne les chemins en fonction de l'énergie restante des nœuds uniquement. De ce fait, afin d'améliorer les performances du protocole AGEM, nous avons proposé une solution basée sur ce dernier et qui implique la qualité de lien dans la sélection des chemins de routage.

3.3 Contribution 1 : le protocole MMGPSR

3.3.1 Travaux connexes

Plusieurs travaux de recherche ont porté sur le routage géographique pour les RCMSFs, nous citons dans cette section les protocoles de routage géographique les plus répandus dans la littérature.

Le protocole de routage "TPGF" [76] et ses différentes versions améliorées : "EA-TPGF" [75] et "AAEEGF" [83], le protocole GPSR [52], le protocole "DGR" [66] et ses deux extensions : "E-DGR" [87] et "PWDGR" [88], les trois protocoles basés sur la vue angulaire "GEAMS" [91], AGEM [7] et celui proposé par Serhan et Diab [92].

Comme il existe d'autres protocoles de routage géographique tels que :

Le protocole "Power-aware QoS Routing for WMSNs (POWQR)" [97] qui sélectionne le prochain saut en fonction de l'énergie restante des nœuds candidats, de la distance qui les sépare de la station de base, du nombre de sauts, du délai et de la qualité du lien. La stratégie de transfert utilisée dans POWQR vise à répartir la charge sur différents chemins, à réduire la congestion au niveau des nœuds et à améliorer la durée de vie des réseaux. La fiabilité de la transmission des paquets est obtenue en augmentant la puissance de transmission d'un nœud. POWQR garantit une fiabilité élevée et un délai court, et maximise la durée de vie des réseaux.

Le protocole "Efficient QoS-aware Geographic Opportunistic Routing protocol (EQGOR)" [99] permet de garantir à la fois la fiabilité et le délai dans les RCMSFs. L'avantage de ce protocole de routage est la capacité à sélectionner efficacement les chemins pour transmettre les données multimédias, ce qui permet une amélioration significative en termes d'efficacité énergétique, de latence et de complexité temporelle. Cependant, EQGOR n'est pas compatible avec certaines fonctionnalités spéciales du trafic multimedia.

3.3.2 Fonctionnement du protocole MMGPSR

Nous détaillons dans le présent chapitre notre première contribution relative au routage géographique multi-chemin pour les RCMSFs. Cette contribution est une amélioration du protocole géographique GPSR [52] pour supporter le routage multi-chemin dans les RCMSFs, appelée "MMGPSR" [100]. L'idée principale est de partager la charge du protocole GPSR entre plusieurs chemins dans le but est de réduire le nombre de paquets au niveau des files d'attente attachées aux nœuds les plus impliqués dans le processus de routage et de prolonger la durée de vie du réseau. En fait, le protocole GPSR sélectionne toujours le même chemin entre une paire de nœuds (le nœud source et la station de base) ce qui provoque l'épuisement rapide des batteries des nœuds qui appartiennent à ce chemin. Cependant, MMGPSR explore et établit un nombre maximal de meilleurs chemins à nœuds-disjoints du nœud source vers le nœud destination où un nœud appartient au plus à un chemin afin d'éviter le chevauchement des données et la congestion dans le réseau. Le protocole MMGPSR supporte plusieurs fonctionnalités afin de satisfaire les exigences de la transmission de données multimédias incluant :

- Transmission de données multimédias sur un ensemble de chemins multiples pour augmenter la bande passante.

- Sélection des plus courts chemins pour réduire les délais de transmission de bout en bout.
- Construction de chemins à nœuds-disjoints où aucun nœud n'est partagé entre les chemins trouvés afin d'éviter la congestion au niveau des nœuds impliqués.
- Contournement des trous de routage (zones vides) pendant la sélection de chemins pour éviter les pertes de paquets et la retransmission de ces derniers.

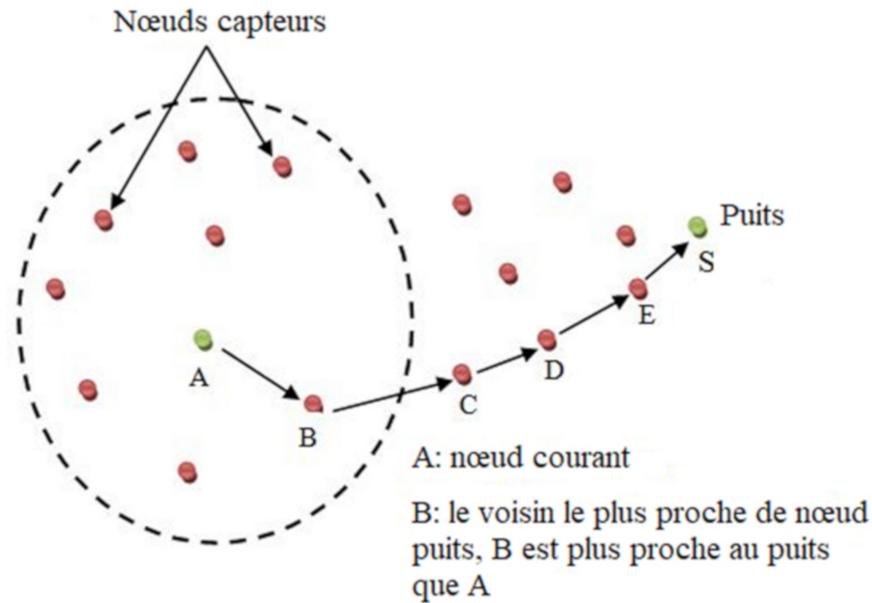


FIGURE 3.1 – Routage glouton

Similaire à la version originale du protocole GPSR, la solution proposée exécute les mêmes modes de routage utilisés dans le protocole GPSR en raison à la fois de leur efficacité et leur simplicité pour la sélection de chemins optimaux. Ces modes sont la transmission gloutonne (Greedy forwarding) et la transmission de périmètre (Perimeter forwarding). Le premier mode est employé lorsqu'un nœud reçoit un paquet de données destiné à la station de base où le voisin direct le plus proche de la station de base est choisi pour transmettre ce paquet (voir figure 3.1).

Dans le cas où un tel nœud ne peut pas être trouvé, cette situation est appelée trou de routage ou bien présence de zone vide comme c'est illustré dans la figure 3.2. Cette situation pourra avoir lieu pour différentes raisons à savoir la présence d'obstacles, le déploiement aléatoire des nœuds, l'épuisement des batteries de quelques nœuds, etc. Dans cette situation, la transmission de périmètre basée sur la règle de la main droite est utilisée comme présenté dans la figure 3.3. Ce mode de transmission permet de faire acheminer le paquet autour de la zone vide dans le sens contraire des aiguilles d'une montre jusqu'à atteindre un nœud plus proche de la station de base que le nœud qui a initié la transmission de périmètre. Une fois un tel nœud est trouvé la transmission gloutonne prend le relais.

Ainsi, étant donné que les paquets multimédias sont généralement volumineux et que l'exigence de transmission peut être supérieure à la capacité de transmission maximale des

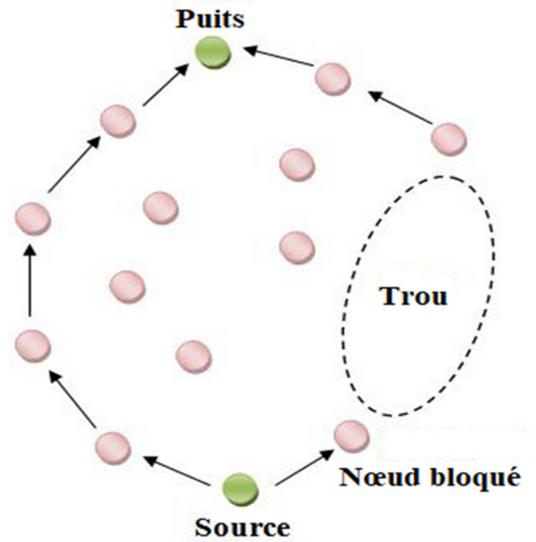


FIGURE 3.2 – Présence d'un trou (vide)

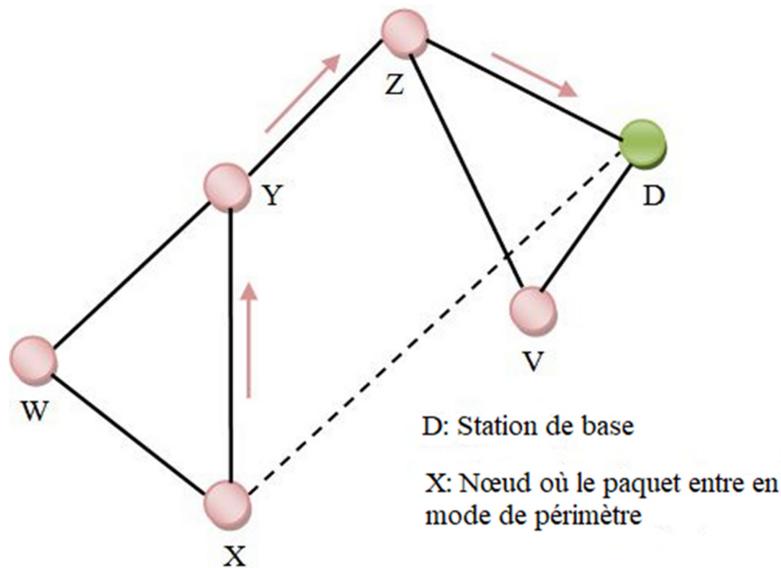


FIGURE 3.3 – Transmission de périmètre

noeuds, le protocole proposé divise chaque paquet collecté par le noeud source en plusieurs sous-paquets dont la taille est prise en charge par le lien physique et chaque sous-paquet est envoyé séparément à travers l'un des chemins trouvés. MMGPSR est exécuté selon l'algorithme suivant :

3.3.3 Evaluation des performances

Dans cette section, nous évaluons les performances du protocole GPSR [52] et du schéma de routage proposé en termes de nombre de paquets reçus par la station de base, taux de paquets perdus, consommation d'énergie et délai de bout en bout.

Algorithm 1 : Algorithmme MMGPSR

```

1: Begin -  $BS$  : station de base dont les coordonnées sont  $(x_b, y_b)$ ,
  -  $N_c$  : nœud courant dont les coordonnées sont  $(x, y)$ ,
  -  $d(N_c, BS)$  : distance euclidienne entre  $N_c$  et  $BS$ ,
  -  $v(N_c)$  : ensemble de voisins  $N_i$  de nœud  $N_c$ ,
  -  $N(N_c)$  : ensemble de voisins  $N_i \in v(N_c)$  ou  $d(N_i, BS) < d(N_c, BS)$ ,
  -  $H(N_c)$  : ensemble de candidats  $\in N_c$  trié par ordre croissant,
  -  $T(Pkt)$  : taille de paquet,
  -  $T(Bfr)$  : taille de buffer,
  -  $T(He)$  : taille de l'en-tête,
  -  $NF$  : nombre de fragments,
  -  $F_i$  : fragment  $i$ ,

2:  $N_c$  calcule la distance euclidienne qui le sépare du  $BS$ ;
    $d(N_c, BS) = \sqrt{(x_c - x_{BS})^2 + (y_c - y_{BS})^2}$ 
3:  $N_c$  calcule la distance euclidienne qui sépare tous ses voisins ( $N_i$ ) de  $BS$ ;
4:  $N(N_c) = \emptyset$ ;
5: for chaque nœud  $N_i \in v(N_c)$  do
6:   if  $d(N_i, BS) < d(N_c, BS)$  then
7:      $N(N_c) = N(N_c) \cup N_i$ ;
8:   end if
9: end for
10:  $H(N_c) = N(N_c)$  trié par ordre croissant en fonction de la distance avec  $BS$ ;
11: if  $(T(Pkt) \leq T(Bfr))$  then
12:   Exécuter le mode de routage GPSR;
13: else
14:   Calculer le nombre de fragments;  $NF = \frac{T(Pkt) - T(H)}{T(Bfr)} + 1$ 
15: end if
16: for  $i$  de 1 à  $NF$  do
17:    $N_c$  envoie  $F_i$  à  $N_i$  où  $(N_i \in H(N_c))$ ;
18: end for
19: End

```

a) Environnement de travail

Nous avons considéré un RCMSF homogène dans lequel les nœuds sont déployés d'une manière aléatoire dans le champ d'intérêt. Ce champ est une zone rectangulaire de dimension 300m x 150m. Nous avons considéré un seul nœud source et une seule station de base et cette dernière est située dans un point fixe au niveau du bord droit du champ d'intérêt aux coordonnées (270,70) tandis que le nœud source est placé sur l'autre bord aux coordonnées (10,70).

Afin d'évaluer les performances du protocole MMGPSR, nous avons utilisé le simulateur OMNeT++ 4.6 [101] qui est un simulateur de réseau à événements discrets et le framework Castalia 3.2. Pour illustrer l'efficacité de notre protocole de routage proposé, nous avons aussi implémenté le protocole GPSR et comparé les résultats obtenus. Les deux protocoles ont été simulés avec des topologies différentes en faisant varier le nombre

de nœuds pour obtenir des topologies de 25, 50, 100, 175 et 350 nœuds. Pour chaque topologie, nous avons mesuré quatre paramètres qui sont : le nombre de paquets reçus (Figure 3.3), le taux de paquets perdus (Figure 3.4), l'énergie consommée (Figure 3.5) et le délai de bout en bout (Figure 3.6). Les simulations ont été exécutées 10 fois pour chaque scénario et la valeur moyenne de chaque critère de performance a été calculée en fonction des résultats de simulation obtenus. Les paramètres utilisés dans les simulations sont résumés dans le tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Paramètres de simulation (MMGPSR)

Paramètre	Valeur
Zone de déploiement	300m x 150m
Nombre de nœuds	25, 50, 100, 175, 350
Communication radio	CC2420
Puissance Rx	62 mW
Puissance Tx	62 mW
Puissance de sommeil	1.4 mW
Taille des paquets	100 bytes
Temps de simulation	300 secondes

b) Résultats de simulation

Nous présentons dans cette sous-section les résultats de simulation et l'impact de l'utilisation du schéma de routage multi-chemin à nœuds-disjoints sur les performances du protocole GPSR amélioré.

Nombre de paquets reçus

La figure 3.4 présente le nombre moyen de paquets reçus pour les deux protocoles (GPSR et MMGPSR). Cette figure illustre que le protocole proposé augmente le nombre de paquets reçus par la station de base par rapport au protocole GPSR, ceci est dû aux chemins alternatifs pris par les paquets transmis par le nœud source.

Taux de paquets perdus

La figure 3.5 présente le taux moyen de paquets perdus pour les deux schémas de routage. Elle montre que le protocole proposé (MMGPSR) réduit considérablement le taux de paquets perdus, cela est dû à la présence de plusieurs chemins contrairement au protocole GPSR où les paquets sont acheminés via le même chemin et ceci pourrait épuiser rapidement les batteries de certains nœuds impliqués dans le processus de routage à travers ce chemin et provoque par la suite un goulot d'étranglement dans le processus de routage via ce chemin.

Consommation d'énergie

La figure 3.6 présente la consommation d'énergie moyenne en fonction du nombre de nœuds pour les deux protocoles GPSR et MMGPSR. Cette figure montre que notre solution proposée est efficace en termes de consommation d'énergie par rapport à la version

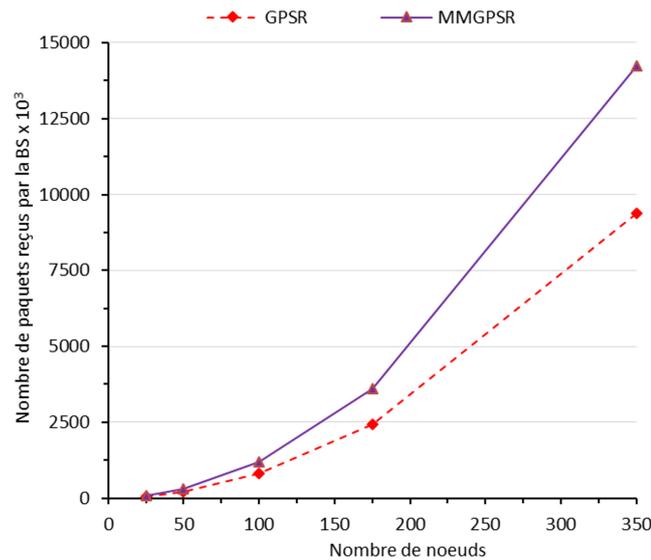


FIGURE 3.4 – Nombre de paquets reçus vs taille du réseau

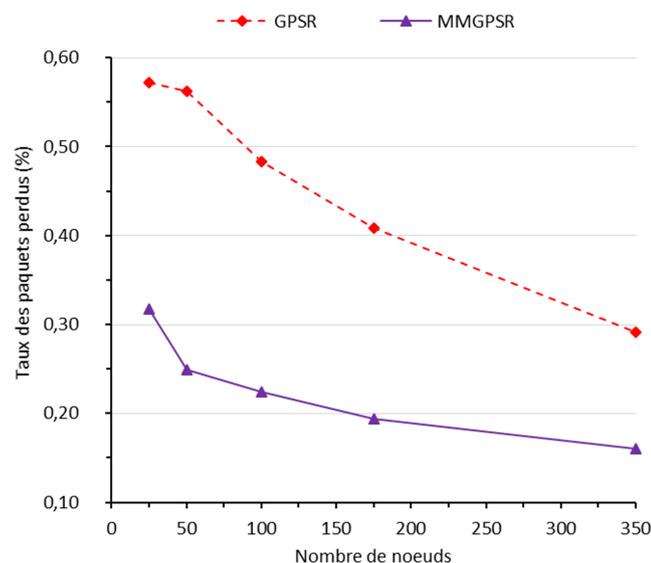


FIGURE 3.5 – Taux de paquets perdus vs taille du réseau

originale de GPSR, ceci est dû au nombre réduit de paquets perdus. Dans le protocole GPSR, lorsqu'un paquet n'est pas reçu avec succès par la station de base, il sera retransmis une autre fois, ce qui entraîne des coûts supplémentaires en termes d'énergie. De plus, dans le protocole proposé, l'énergie est consommée d'une manière équitable puisqu'un grand nombre de nœuds est impliqués dans le processus de routage, ce qui permet une longue durée de vie du réseau.

Délai de bout en bout

La figure 3.7 présente le délai de bout en bout moyen pour transmettre les paquets du nœud source au nœud puits en fonction du nombre de nœuds pour les deux schémas de routage. Cette figure illustre que dans les deux protocoles il n'y a pas d'amélioration du

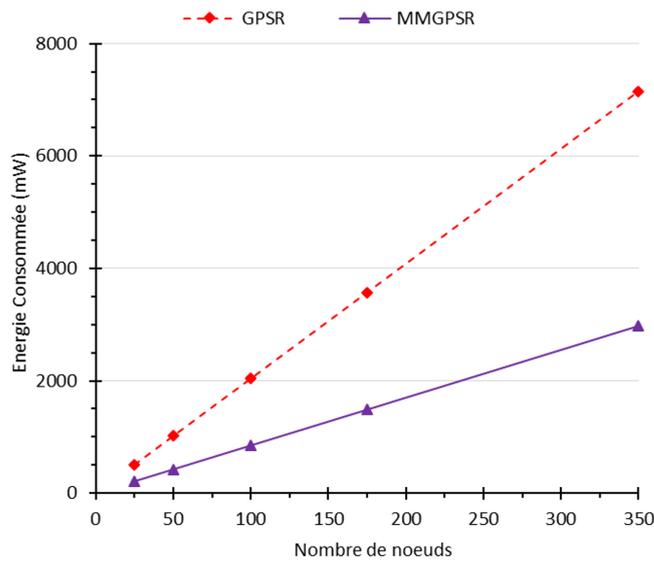


FIGURE 3.6 – Énergie consommée vs taille du réseau

délat de transmission puisque les chemins sont établis une seule fois et les paquets sont acheminés via ces chemins vers la station de base.

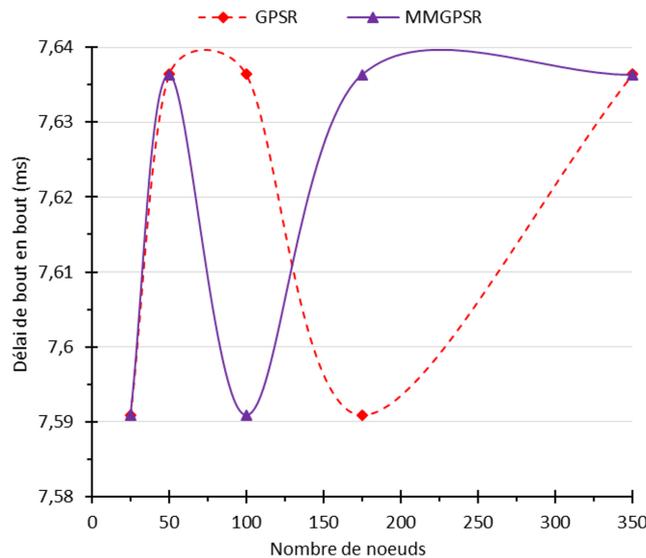


FIGURE 3.7 – Latence vs taille du réseau

3.4 Contribution 2 : le protocole TLQM-AGEM

L'inspiration de la solution proposée TLQM-AGEM [94] vient du fonctionnement du protocole AGEM. TLQM-AGEM vise à atteindre une bonne efficacité énergétique et à prendre en compte les exigences de la QoS des applications multimédias. L'idée de base est de rajouter la métrique "qualité du lien" au protocole AGEM dans le but de sélectionner des chemins de routage à nœuds-disjoints avec de liens de communication fiables.

Dans cette section, l'estimation de la qualité du lien, la sélection des voisins, la fonction de coût de routage, la construction des chemins et l'algorithme de la solution de routage proposée sont présentées en détails.

3.4.1 Estimation de la qualité du lien

Avant d'aborder les détails de notre contribution, nous donnons quelques définitions et notations qui sont indispensables pour faciliter la compréhension de contenu qui suit.

- Rapport signal-bruit "SNR" : présente la différence en décibels entre la force pure du signal reçu et le bruit de fond. Par rapport au "RSSI", le SNR peut offrir une bonne estimation de la qualité des liens [85]. Cependant, il n'offre pas une plus grande surface pour la classification de la qualité des liens, il distingue seulement les liens de haute qualité des autres liens.
- Indicateur de qualité de lien "LQI" : est une caractérisation de la force et de la qualité du signal reçu. Une valeur élevée de LQI indique une force de signal élevée tandis qu'une faible valeur de LQI présente une faible intensité de signal. LQI ne peut pas classer avec précision les liens de haute et de mauvaise qualité en raison de la forte variance.
- Rapport de réception de paquets "PRR" : présente le rapport des paquets reçus à la station de base au nombre total de paquets transmis par le nœud source pendant une fenêtre de temps prédéfinie. PRR est une méthode simple, implémentable sur les différents émetteur-récepteurs. La précision de cette métrique dépend essentiellement de la taille de la fenêtre temporelle [85]. Les liens ayant un rapport PRR très élevé ou bien très faible sont estimables à partir de la plus petite fenêtre de temps sélectionnée, tandis que pour estimer les liens avec un PRR moyen une plus grande fenêtre temporelle est nécessaire.
- Métrique triangulaire de qualité de lien : les mesures LQI et SNR donnent des informations immédiates sur la qualité du canal pendant la réception des paquets mais elles ne considèrent pas la distribution de perte de paquets sous-jacente contrairement à la valeur PRR. Chaque mesure fournit individuellement des informations sur les caractéristiques du lien. Une seule métrique de qualité de lien détecte un attribut de lien spécifique et ne fournit donc qu'une caractérisation partielle du lien. Pour surmonter ces inconvénients, deux ou trois métriques de qualité de lien peuvent être fusionnées pour évaluer la qualité du lien avec une meilleure précision. La métrique triangulaire de qualité des liens est une métrique hybride, qui fusionne les valeurs SNR, LQI et PRR en un estimateur robuste qui garantit une évaluation fiable de la qualité du lien [102].

Afin d'inclure les informations concernant les rapports de réception de paquets (PRR), au lieu d'utiliser la moyenne statique, nous calculons les deux sommes des valeurs SNR et LQI des paquets reçus par la station de base et ensuite les divisons par le nombre total de paquets transmis par le nœud source. Les valeurs SNR et LQI pour chaque paquet reçu "k" sont notés respectivement par SNR_k et LQI_k . SNR et LQI représentent respectivement

les valeurs moyennes de l'indicateur de qualité de lien et le rapport signal-bruit. Elles sont calculées comme indiqué dans les équations (3.1) et (3.2).

$$SNR = \frac{\sum_{k=1}^m SNR_k}{n} \quad (3.1)$$

$$LQI = \frac{\sum_{k=1}^m LQI_k}{n} \quad (3.2)$$

où "n" représente le nombre total de paquets de données transmis et "m" le nombre de paquets reçus avec succès pendant une fenêtre temporelle prédéfinie. Par suite, la métrique triangulaire est décrite selon l'équation (3.3).

$$TM = \sqrt[2]{SNR^2 + LQI^2} \quad (3.3)$$

3.4.2 Sélection de voisins

Similaire à la version originale du protocole AGEM, le protocole TLQM-AGEM comporte une stratégie d'autoadaptation de l'angle de vue pour choisir les voisins avec un petit écart angulaire par rapport à la ligne virtuelle entre le nœud courant et la station de base où le nombre de ces voisins doit satisfaire un seuil minimal. Initialement, le nœud courant sélectionne les nœuds les plus proches de la station de base et qui sont dans l'angle $\alpha < 30^\circ$. Au moins deux nœuds doivent être trouvés (appelé Neighbor Set (NS)) afin de garantir une fonctionnalité d'équilibrage de charge. Si ce n'est pas le cas, l'angle α sera incrémentée par des pas de 10° jusqu'à ce que la limite de 180° soit atteinte. A cette étape si aucun nœud n'est trouvé on dit que le nœud courant est en face d'un trou de routage (zone vide), et dans ce cas TLQM-AGEM exécute le mode de la transmission en marche arrière tout comme la version originale pour sortir de cette situation. Dans ce mode de transmission, le nœud courant informe l'ensemble de ses voisins directs qu'il ne peut pas être impliqué pour router les paquets de données et délègue la responsabilité d'acheminer ce paquet reçu à son voisin le plus proche de la station de base. Ce processus est répété de la même manière jusqu'à ce qu'il atteigne un nœud qui peut transmettre le paquet à la station de base. Le choix du nœud relais (saut suivant) depuis l'ensemble des voisins sélectionnés (NS) dépend du score attribué à chacun de ces candidats par la fonction d'objectif présentée dans la section suivante.

3.4.3 Fonction du coût de routage

Le protocole TLQM-AGEM construit des chemins à nœuds-disjoints en tenant compte de la distance entre les voisins et la station de base, l'énergie résiduelle des voisins et la métrique triangulaire de qualité de lien proposée dans [102]. Le nœud transmetteur (a) choisit le prochain saut (b) pour transmettre le paquet vers la station de base en fonction du score retourné par la fonction d'objectif suivante :

$$cost(a, b) = (Dist_{(b,BS)})^\alpha * (TM_{(a \rightarrow b)})^{-\beta} * (RE_b)^{-\gamma} \quad (3.4)$$

$$\text{où } \alpha + \beta + \gamma = 1$$

$(Dist_{(b,BS)})$, $TM_{(a \rightarrow b)}$ et RE_b représentent respectivement la distance euclidienne entre le voisin (b) et la station de base (BS), la métrique triangulaire de qualité de lien $a \rightarrow b$ et l'énergie restante du nœud candidat (b).

Les paramètres utilisés dans cette fonction d'objectif sont les mêmes que ceux définis dans la fonction de coût proposée dans TIGMR [85]. Dans la fonction originale, les valeurs des pondérations sont fixées à 0,6 pour (α), 0,2 pour (β) et 0,2 pour (γ), cependant, dans TLQM-AGEM, lorsque les pondérations ci-dessus sont variées, nous avons observé que pour des performances optimales équilibrées entre la fiabilité, la durée de vie du réseau et débit de transmission, il faut choisir les valeurs des pondérations de la manière suivante :

$$\alpha > \gamma \geq \beta$$

À cette fin, nous avons attribué à ces coefficients de pondération les valeurs suivantes :

$$\alpha = 0.5; \quad \beta = 0.2; \quad \gamma = 0.3.$$

3.4.4 Sélection des chemins

Après avoir sélectionné les candidats disponibles (voisins directs non impliqués dans aucun autre chemin pour garantir la disjonction de chemins) pour la transmission en utilisant le routage glouton intelligent proposé dans AGEM [7,8]. La fonction de coût de routage (3.4) est calculée pour chacun de ces candidats. Ces derniers sont triés en fonction du coût de routage du plus bas (le meilleur voisin) au plus élevé (le pire voisin). Ensuite, similaire au protocole AGEM, le but principal est d'acheminer le paquet avec un grand nombre de sauts par le meilleur nœud voisin et le paquet avec un petit nombre de sauts à travers le candidat le moins bon .

A cet effet, un nœud intermédiaire enregistre une paire de valeurs "(NH,i)" où "NH" représente le nombre moyen de sauts pour un paquet du nœud source au nœud puits, et "i" représente le nœud voisin qui a un score plus proche de la moyenne des scores de l'ensemble de nœuds voisins ("NS"). Lorsqu'un nœud transmetteur reçoit un paquet, il vérifie s'il a déjà reçu un paquet qui provient du nœud source, si ce n'est pas le cas, le paquet sera transmis au meilleur nœud voisin et il devra enregistrer le nombre de sauts "NH" et l'indice "i" du nœud voisin qui a un score plus proche de la moyenne des scores (ces deux valeurs seront utilisées ensuite pour réaliser l'équilibrage de charge) comme le montre la figure 3.8.

Dans le cas où le nœud transmetteur a déjà reçu un paquet qui provient du nœud source ce qui implique qu'il a déjà une estimation de "(NH,i)", il calcule le Δhc qui représente la différence entre le nombre de sauts actuel et celui stocké, ainsi que l'indice du nœud voisin qui permet un équilibrage de charge. Selon ce dernier (l'indice i), deux cas doivent être considérés : le cas où l'indice "i" est inférieur ou égal à 0 ce qui signifie que le paquet a fait beaucoup de sauts et par conséquent le paquet sera acheminé vers le meilleur voisin, et le cas où l'indice "i" est supérieur à "m" ce qui signifie que le paquet a fait moins de sauts et par conséquent le paquet sera acheminé vers le nœud voisin moins bon (voir la figure 3.9).

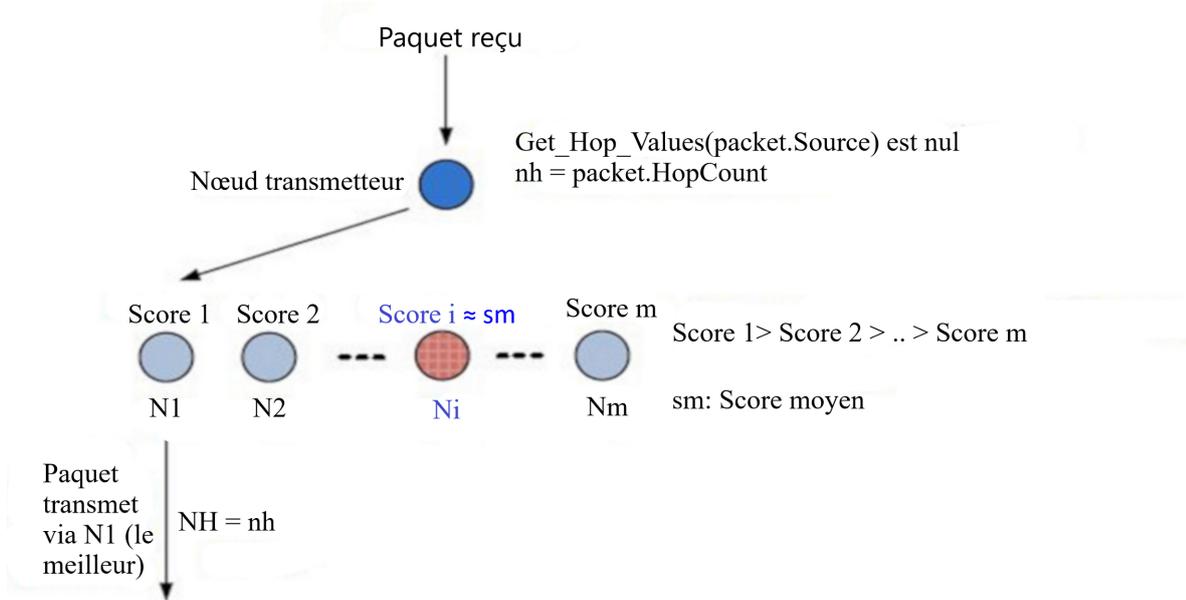


FIGURE 3.8 – Routage d'un paquet d'un flux inconnu [7]

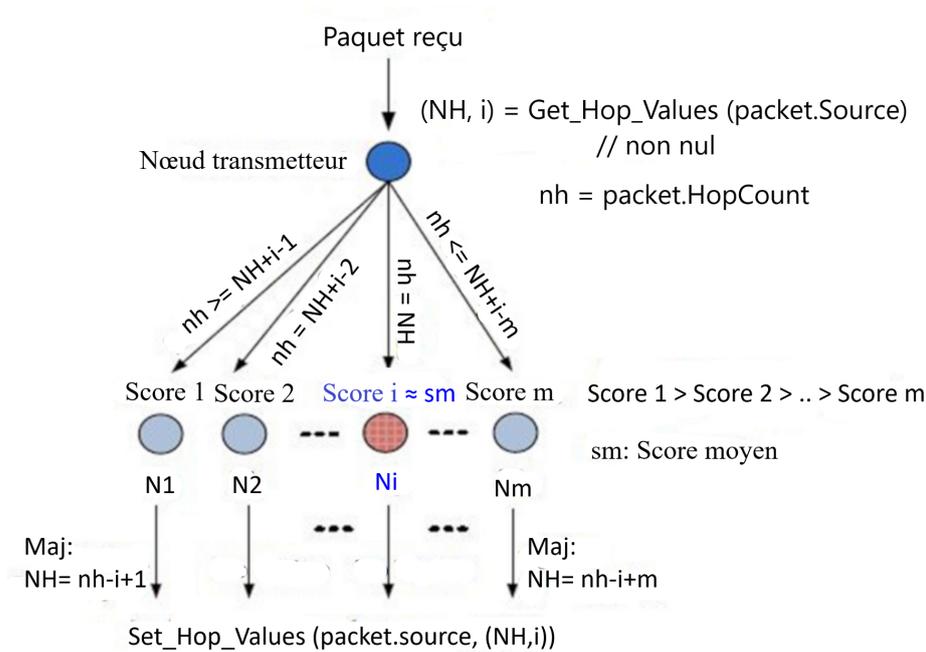


FIGURE 3.9 – Routage d'un paquet d'un flux connu [7]

3.4.5 Fonctionnement de TLQM-AGEM

Le protocole TLQM-AGEM fonctionne selon l'algorithme (2). Cet algorithme est basé sur celui utilisé dans le protocole de routage AGEM.

Algorithm 2 : Étapes d'exécution du protocole TLQM-AGEM

```

1: Begin
  - BN : ensemble des voisins dans NS triés par ordre croissant selon leurs scores,
  -  $m = |BN|$  : représente le cardinal de l'ensemble BN,
  -  $i$  : indice du nœud dans BN dont le score est le plus proche de la moyenne des scores
    des nœuds voisins dans BN,
  - Get_Hop_Values(pkt.SourceNode) : retourne les valeurs stockées du nombre de sauts
    à partir de la source connue et l'indice  $i$  du score moyen de tous les nœuds les plus
    proches de la station de base (BS),
  - Set_Hop_Values(pkt, SourceNode, NH, i) : enregistre la valeur empirique du nombre
    de sauts depuis la source avec la valeur NH et  $i$  comme étant l'indice du voisin dont
    le score se rapproche du score moyen,

2: if (Get_Hop_Values(pkt.SourceNode)) == NULL then
3:   Forward(pkt, BN1);
4:    $NH = pkt.HopCount$ ;
   /*Enregistre le nombre de sauts depuis le nœud source dans  $NH_i$  et  $i$  comme l'indice du
   nœud voisin avec un score proche du score moyen de l'ensemble de voisins sélectionnés*/
5:   Set_Hop_Value(pkt.SourceNode, NH, i);
6: else
7:    $(H, i) = Get\_Hop\_Values(pkt.SourceNode)$ ;
8:    $\Delta(hc) = NH - pkt.HopCount$ ;
9:    $index = i + \Delta(hc)$ 
10:  if ( $index \leq 0$ ) then
11:     $NH = NH - index + 1$ ;
12:     $index = 1$ ;
13:  else
14:    if ( $index > m$ ) then
15:       $NH = NH - index + m$ ;
16:       $index = m$ ;
17:    end if
18:  end if
19:  Forward(pkt, BNindex);
20:  Set_Hop_Value(pkt, SourceNode, NH, i);
21: end if
22: End

```

3.4.6 Evaluation des performances

Dans cette section, nous évaluons les performances des protocoles AGEM, GEAMS et TLQM-AGEM en termes de nombre de paquets reçus par la station de base, taux de paquets perdus, consommation d'énergie et délai de bout en bout.

a) Environnement de travail

Toutes les simulations ont été réalisées en utilisant le simulateur OMNeT++ [101] version 4.6 et le framework Castalia version 3.2. Tous les nœuds de capteurs multimédias sont stationnaires et déployés d'une manière aléatoire dans une zone de détection de 500m x 200m. Le nœud source est situé en (10,90) et la station de base est située en (490,90) de la région. Nous avons évalué les performances des trois protocoles pour des réseaux de tailles variables : 30, 50 et 80 nœuds. Nous avons réalisé les simulations selon les paramètres présentés dans le tableau 3.2 en exécutant chaque scénario 10 fois et nous avons calculé la moyenne de chaque critère de performance en fonction des résultats obtenus.

TABLE 3.2 – Paramètres de simulation (TLQM-AGEM)

Paramètre	Valeur
Zone de déploiement	500m x 200m
Nombre de nœuds	30, 50, 80
Position de la station de base	(490, 90)
Portée de transmission	80m
Taille de l'image	100 kbps
Énergie initiale des noeuds	5 J
Énergie initiale de la BS	10 J
Temps de simulation	200 secondes

b) Résultats de simulation

Dans cette section, nous évaluons les protocoles TLQM-AGEM, GEAMS et AGEM en termes du taux de paquets délivrés "Packet Delivery Ratio (PDR)", de taux de perte de paquets, de délai de bout en bout et de l'énergie résiduelle pour différentes topologies et nous comparons les résultats obtenus.

Taux de livraison des paquets (PDR)

PDR présente le rapport entre les paquets délivrés avec succès à la station de base et ceux produits par le nœud source.

La figure 3.10 illustre le taux moyen de paquets délivrés avec succès à la station de base pour les protocoles GEAMS, AGEM et TLQM-AGEM. À partir de cette figure, il est observé que le PDR moyen pour TLQM-AGEM est plus grand que ceux des protocoles GEAMS et AGM, cela est dû à la construction de chemins disjoints qui permettent à éviter la congestion au niveau des nœuds. En outre, l'utilisation de la qualité de lien comme métrique dans le protocole TLQM-AGEM favorise la sélection des chemins les plus fiables et par conséquent cela permet d'augmenter la probabilité de réception des paquets avec succès par la station de base.

Taux de perte de paquets

La figure 3.11 illustre le taux de perte de paquets pour les trois protocoles de routage (AGEM, TLQM-AGEM et GEAMS). Nous observons que les protocoles GEAMS

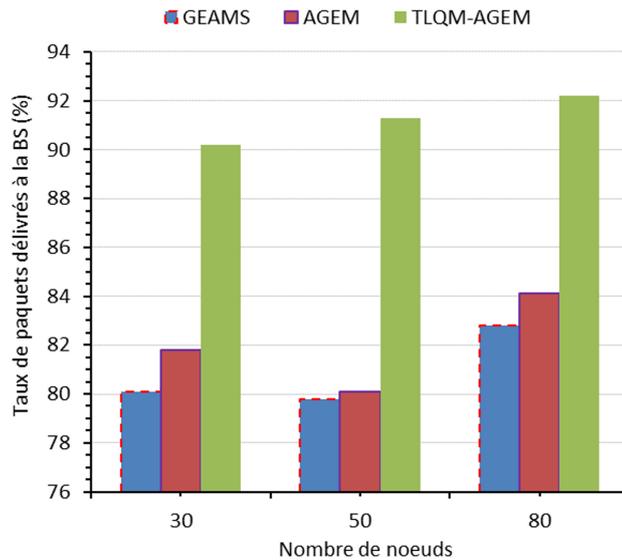


FIGURE 3.10 – Taux moyen de paquets délivrés à la station de base

et AGEM enregistrent des taux de perte de paquets assez conséquents par rapport au protocole TLQM-AGEM car dans ces deux protocoles, la décision de routage est basée uniquement sur la distance entre les voisins à un saut et la station de base, et l'énergie restante de ces voisins. A cet effet, les liens de communication de faible ou de mauvaise qualité dans les chemins de routage ne peuvent pas être évités pendant la construction des chemins. Par contre, dans TLQM-AGEM le taux de perte de paquets est minimisé en raison de l'utilisation de la métrique triangulaire de qualité de lien dans la sélection du prochain saut.

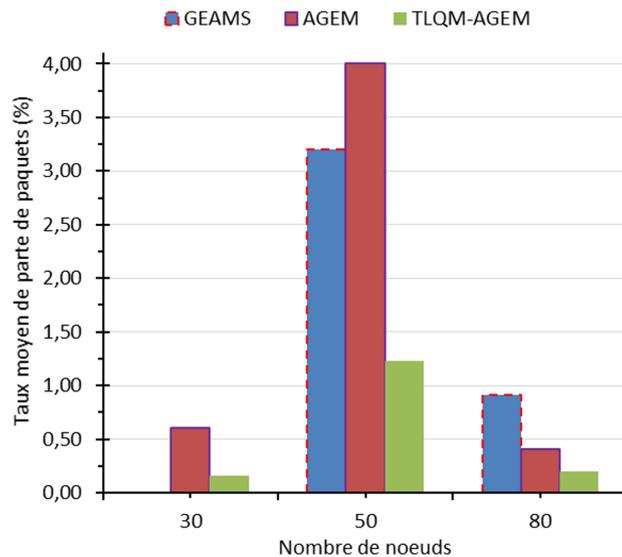


FIGURE 3.11 – Taux moyen de perte de paquets

Délai de bout en bout

La figure 3.12 présente le délai moyen de bout en bout pour différentes topologies dans les trois protocoles (TLQM-AGEM, GEAMS et AGEM). Le délai de bout en bout dans TLQM-AGEM est faible par rapport à GEAMS et AGEM en raison des meilleurs chemins disjoints choisis pour transmettre les paquets vers la station de base, ce qui protège les paquets des problèmes d'interférences et évite par la suite le processus de retransmission.

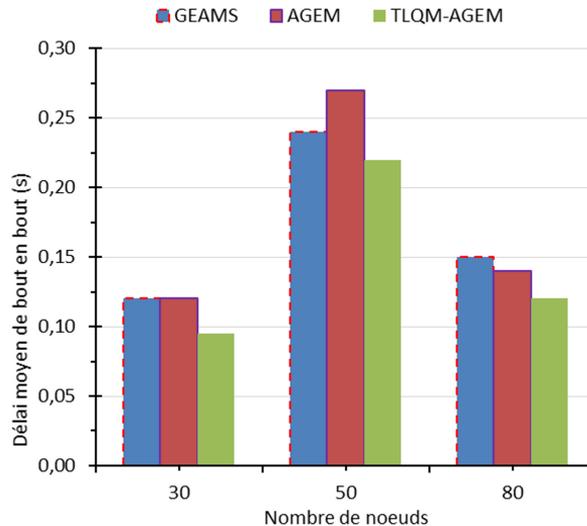


FIGURE 3.12 – Délai moyen de bout en bout

Énergie résiduelle moyenne

La figure 3.13 présente l'énergie résiduelle moyenne pour TLQM-AGEM, GEAMS et AGEM. Elle montre que GEAMS et AGEM consomment moins d'énergie que le protocole TLQM-AGEM, cela est dû à la livraison d'un plus petit nombre de paquets de données dans ces deux protocoles par rapport au protocole TLQM-AGEM. En outre, TLQM-AGEM investit plus d'énergie pour choisir des chemins fiables en utilisant la métrique triangulaire de qualité de lien.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé deux protocoles de routage pour les RCMSFs. Le premier protocole proposé (MMGPSR) est une amélioration du protocole GPSR où l'aspect multi-chemin a été introduit. Les résultats de simulation obtenus illustrent que notre solution proposée fournit de meilleures performances par rapport au protocole GPSR en termes de nombre de paquets reçus par la station de base, taux de paquets perdus et de consommation d'énergie. Le deuxième protocole de routage (TLQM-AGEM) est une amélioration du protocole AGEM où la métrique qualité de lien a été ajoutée à la version originale lors de l'établissement des chemins entre un nœud source et la station de base. Ce processus de sélection des nœuds relais (saut suivant) permet de construire les chemins les plus fiables entre le nœud source et la station de base et cela réduit le taux de perte de paquets. Les résultats de simulation ont montré que le protocole TLQM-AGEM fournit

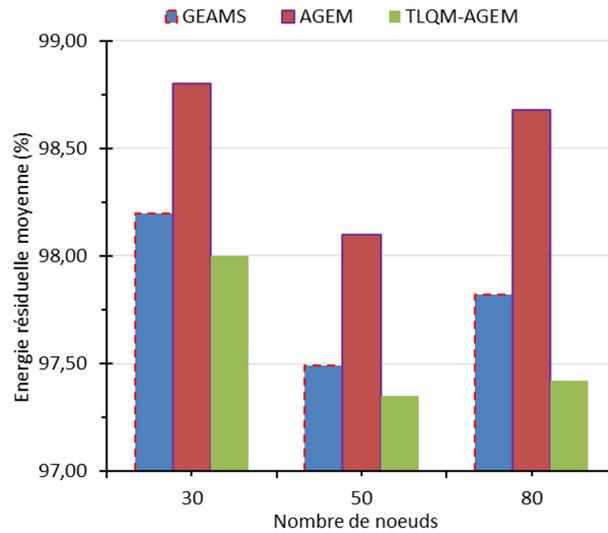


FIGURE 3.13 – Énergie résiduelle moyenne

de meilleures performances par rapport aux protocoles GEAMS et AGEM en termes de taux de paquets délivrés avec succès à la station de base, de taux de perte de paquets et de délai de bout en bout.

Dans le chapitre suivant, nous allons proposer deux nouveaux protocoles de routage géographique multi-chemin destinés aux RCMSFs. Ces deux protocoles proposés sont basés sur deux approches gloutonnes.

Chapitre 4

Routage multi-chemin basé sur la transmission gloutonne dans les RCMSFs

Chapitre 4

Routage multi-chemin basé sur la transmission gloutonne dans les RCMSFs

4.1 Introduction

Pour concevoir le routage multi-chemin, plusieurs travaux comme dans [61, 86] se focalisent sur l'approche des chemins disjoints. Cette approche illustre l'indépendance des chemins en termes de ressources partagées et permet de trouver des chemins disjoints entre une paire de nœuds (source et destination) en fonction du degré d'indépendance de chaque chemin de routage. En raison du fait que le routage géographique se distingue par ses avantages particuliers tels qu'il ne nécessite pas de maintenance des tables de routage et de construction de chemins pendant le processus de transfert de données, nous adoptons cette stratégie de routage pour la transmission des contenus multimédias qui se caractérisent par leur grande taille. A cet effet, dans ce chapitre, nous proposons deux contributions relatives au routage géographique multi-chemin à nœuds-disjoints basées sur une transmission gloutonne pour les RCMSFs. La première consiste en un protocole appelé "LQLB-MGR" [103]. Ce protocole fonctionne en deux phases : la première phase sert à sélectionner les différents chemins à nœuds-disjoints, tandis que la deuxième phase permet à équilibrer la charge entre l'ensemble des chemins construits durant la première phase. La deuxième contribution consiste en un deuxième protocole appelé "GCGM". Ce protocole combine les deux approches de la stratégie de la transmission gloutonne et attribue des coefficients de pondération à chacune des deux approches (greedy et compass).

4.2 Contribution 1 : Le protocole LQLB-MGR

4.2.1 Contexte

Les caractéristiques des contenus multimédias et les contraintes des ressources des RCMSFs diminuent la fiabilité du réseau, ce qui affecte la qualité de service et rend le routage de données dans ce type de réseaux un grand défi. Par ailleurs, le routage multi-chemin est considéré comme une solution efficace pour répondre à ces exigences. Cependant, la consommation d'énergie élevée dans les RCMSFs est une préoccupation

critique pour la durée de vie du réseau contenant des nœuds avec une batterie à faible puissance et qui est ni remplaçable ni rechargeable dans la plupart des scénarios. De nombreux travaux proposés ont conçu des protocoles de routage multi-chemin pour fournir un équilibrage de charge entre les chemins découverts, bien qu'il y ait un compromis entre l'efficacité énergétique et la délivrance de données. De plus, les liens de communication sans fil ne sont pas fiables, ce qui peut affecter les performances du réseau.

Dans ce contexte, nous avons proposé un protocole qui sélectionne des chemins avec des liens de communication de bonne qualité et garantit l'équilibrage de charge entre l'ensemble des chemins découverts, appelé "LQLB-MGR". Ce protocole s'exécute en deux phases. La première phase est chargée de trouver les différents chemins à nœuds-disjoints entre le nœud source et la station de base ayant une qualité de lien élevée et la deuxième phase permet un équilibrage de charge entre les chemins établis durant la première phase en fonction de l'énergie résiduelle nodale.

4.2.2 Travaux connexes

En raison des divers avantages du routage multi-chemin par rapport au routage mono-chemin, le routage multi-chemin est considéré comme une solution prometteuse pour les RCMSFs. Dans ce contexte, de nombreux protocoles de routage géographique multi-chemin ont été proposés pour répondre aux exigences de QoS dans ce type de réseaux. Les protocoles de routage multi-chemin à chemins disjoints peuvent atteindre une bande passante plus élevée et une plus grande fiabilité que les protocoles de routage multi-chemin qui ne prennent pas en considération l'aspect disjoint lors de la construction des chemins entre la source et la destination. Il existe un grand nombre de travaux de recherche qui se concentrent sur les protocoles de routage multi-chemin à chemins disjoints dans les RCMSFs. La plupart de ces protocoles proposés visent l'équilibrage de charge entre tous les nœuds du réseau pour augmenter la durée de vie du réseau.

Dans [104], les auteurs ont proposé le protocole "an Energy Balancing Multipath Routing protocol (EBMR)". Ce protocole vise à augmenter l'équilibrage de la consommation énergétique entre les chemins trouvés entre un nœud source et la station de base. Il prend en compte à la fois l'énergie résiduelle des voisins et la distance entre ces voisins et la station de base. Dans EBMR, les nœuds impliqués dans plusieurs chemins consomment de l'énergie de manière équitable mais le problème d'interférences se pose lors des transmissions parallèles à travers des chemins adjacents.

Dans [105], les auteurs ont présenté un protocole de routage géographique multi-chemin pour les RCMSFs, appelé "Geographic Multipath Routing Protocol (GMRP)". Ce protocole comprend deux phases : la transmission géographique et l'optimisation du routage à travers les chemins. GMRP prend en compte les plus courts chemins à nœuds-disjoints, l'acheminement de données à travers plusieurs chemins et le contournement des trous. Il réalise un équilibrage de charge en terme de consommation d'énergie entre les différents chemins impliqués dans le processus de routage de données.

Dans [89], les auteurs ont proposé une version améliorée du protocole "EE-PWDGR" [89], appelée "EELB-PWDGR". Ce protocole vise à améliorer l'équilibrage de charge en terme d'énergie. EELB-PWDGR s'exécute de la même manière que le protocole EE-PWDGR, à l'exception des paramètres de QoS et de l'utilisation de la prise de décision en logique floue pour l'équilibrage de charge.

Dans [90], les auteurs ont proposé une version améliorée du protocole EELB-PWDGR, appelée "ABC-EELB-PWDGR" dans laquelle la métaheuristique "Artificial Bee Colony (ABC)" a été utilisée dans le but d'améliorer les performances du protocole EELB-PWDGR. Dans ce protocole, l'approche ABC est utilisée pour sélectionner le chemin optimal satisfaisant les contraintes de la QoS. ABC-EELB-PWDGR fournit de meilleures performances comparativement au protocole EELB-PWDGR mais l'algorithme ABC utilisé dans ABC-EELB-PWDGR dégrade plus ou moins ces performances à cause de la lenteur de la vitesse de recherche et la population qui n'est pas très diversifiée. En outre, dans [90], une extension du protocole ABC-EELB-PWDGR a été proposée, appelée EABC-EELB-PWDGR". Ce protocole de routage utilise la méthode de recherche chaotique et le mécanisme d'apprentissage basé sur l'opposition dans l'initialisation de la population pour améliorer la convergence globale.

Dans [91], S. Medjah et al. ont présenté le protocole "GEAMS" pour gérer les données multimédias en continu en tenant compte de l'équilibrage de charge et du maintien de l'efficacité énergétique, et de la restriction de la qualité de service. Les auteurs de [8] ont proposé le protocole "AGEM" pour surmonter les limites du protocole GEAMS. La principale différence entre GEAMS et AGEM se situe dans le premier mode, dans lequel AGEM sélectionne des nœuds avec un angle angulaire minimum défini à partir d'une ligne virtuelle vers la destination pour le transfert de données à travers plusieurs chemins. En outre, Z. Serhan et al. [92] ont proposé une version améliorée du protocole AGEM qui permet l'efficacité énergétique et assurer la QoS. Dans le protocole proposé, la sélection du prochain saut est comme dans AGEM avec l'ajout de la priorité de trafic.

Dans [93], les auteurs ont présenté un protocole de routage géographique multi-chemin économe en énergie et sensible à la qualité de service pour les RCMSFs, appelé "E-AGEM". E-AGEM est une extension du protocole AGEM. Contrairement à AGEM, E-AGEM utilise une technique de routage améliorée qui prend en compte la portée totale du champ angulaire vers la station de base. En outre, E-AGEM implique deux autres métriques qui sont l'angle de vue et la distance par rapport à la station de base dans la fonction de coût et prend aussi en charge différents types de trafic.

Dans les RCMSFs, garantir une réception avec succès des données multimédias au niveau de la station de base avec une probabilité élevée est un vrai défi. Par ailleurs, la fiabilité, le délai de bout en bout et le débit dépendent de la qualité de lien le long du chemin de routage entre le nœud source et la station de base. De nombreux protocoles de routage géographique à chemins multiples construisent les chemins de routage entre le nœud source et la station de base avec une qualité de lien élevée.

Dans [84], les auteurs ont proposé un protocole "LQEAR" afin d'améliorer les performances des protocoles existants en impliquant la métrique "LQI" lors de la sélection des chemins. LQEAR sélectionne plusieurs chemins disjoints en fonction de la distance, de la valeur LQI et de l'énergie restante. Il est constaté que les performances fournies par le protocole LQEAR ne sont pas très satisfaisantes à cause de la métrique LQI qui ne permet pas d'évaluer la qualité de lien avec une grande précision et cela se répercute sur la fiabilité de routage.

Dans [85], les auteurs ont conçu un nouveau schéma de routage géographique à chemins multiples "TIGMR" dans lequel ils ont impliqué une métrique de qualité de lien triangulaire avec une interférence minimale entre les chemins. Ce protocole établit des chemins à nœuds-disjoints sur la base d'une métrique triangulaire de qualité de lien, de

l'énergie résiduelle des nœuds et de la distance entre ces nœuds et la station de base tout en anticipant les effets minimaux d'interférence entre les chemins adjacents.

Dans [86], les auteurs ont proposé une solution de routage à chemins multiples, basée sur la localisation "EEMGR". EEMGR construit des chemins à nœuds-disjoints optimaux basés sur la métrique ETX, la distance des voisins à un saut avec la station de base et l'énergie restante de ces voisins.

4.2.3 Hypothèses

Dans le protocole proposé, nous supposons que le réseau se compose d'un nombre constant de nœuds de capteurs multimédias déployés aléatoirement dans une zone d'intérêt. Chacun de ces nœuds connaît sa propre position géographique en utilisant un système de localisation comme le "GPS". Nous considérons un seul nœud source et un seul nœud puits, et tous les nœuds ont les mêmes caractéristiques en termes d'espace mémoire et de puissance de batterie, à l'exception du nœud puits et du nœud source.

4.2.4 Modèle d'énergie radio

Dans cette solution de routage proposée, nous utilisons le modèle de consommation d'énergie proposé dans [37] dans lequel lorsqu'un nœud "a" transmet un paquet de données de taille "n" octets au nœud "b" d'une distance "D", l'énergie du nœud "a" diminue de $E_{tx}(n, D)$ comme décrit par l'équation (4.1) et l'énergie du nœud "b" diminue de $E_{rx}(n)$ comme exprimé dans l'équation (4.2).

$$E_{tx}(n, D) = n * (E_{elec} + \varepsilon_{amp} * D^2) \quad (4.1)$$

$$E_{rx}(n) = n * E_{elec} \quad (4.2)$$

où E_{elec} est l'énergie de transmission/réception électronique et ε_{amp} représente l'énergie d'amplification.

4.2.5 Le protocole LQLB-MGR

LQLB-MGR est un protocole de routage géographique multi-chemin dans lequel plusieurs chemins de routage entre le nœud source et la station de base sont construits pour transmettre des données multimédias. Dans LQLB-MGR, tous les chemins de routage sont des chemins à nœuds-disjoints. La caractéristique de nœud-disjoint est utilisée car généralement la transmission des contenus multimédias dans les RCMSFs exploitera la capacité de transmission maximale de chaque chemin. Notre solution de routage proposée se déroule en deux phases. La première phase sert à générer des chemins à nœuds-disjoints tandis que la seconde est responsable de l'équilibrage de charge des données entre tous les chemins générés.

a) Découverte des chemins à nœuds-disjoints

Cette phase du protocole LQLB-MGR est principalement dédiée à la construction de l'ensemble des chemins à nœuds-disjoints entre le nœud source et la station de base où

le saut suivant est sélectionné en fonction de la valeur "ETX" en tant que métrique de qualité de lien, l'énergie résiduelle des voisins et la distance entre les voisins à un saut et la station de base.

ETX est une mesure de qualité de lien qui peut être utilisée pour trouver des chemins de routage fiables. *ETX* d'un lien sans fil entre une paire de nœuds présente le nombre présumé de transmissions de données nécessaires pour qu'un paquet arrive au nœud destinataire avec succès. La valeur *ETX* d'un lien sans fil est calculée en utilisant les taux de livraison aller-retour entre les deux nœuds communicants. Le taux de livraison aller (d_f) représente la probabilité qu'un paquet atteigne avec succès la destination tandis que le taux de livraison inverse (d_r) représente la probabilité que le paquet ACK soit reçu avec succès par le nœud source. La probabilité présumée qu'une transmission d'un paquet soit reçue et acquittée avec succès est ($d_f * d_r$). La valeur *ETX* est calculée selon l'équation (4.3) [106].

$$ETX = \frac{1}{d_f * d_r} \quad (4.3)$$

La meilleure valeur de *ETX* est 1, ce qui signifie que pour chaque paquet de données, la transmission réussira dès la première tentative, et la valeur *ETX* la plus élevée est 4 (selon le nombre total de tentatives de transmission spécifié par IEEE 802.15.4).

Pour deux nœuds capteurs n_a et n_b , $Dist(n_a, n_b)$ représente la distance euclidienne entre ces deux nœuds, r est la portée de transmission radio et SN_a représente l'ensemble des voisins à un saut du nœud n_a où :

$$SN_a = \{n_b | n_b \neq n_a \wedge Dist(n_a, n_b) \leq r\} \quad (4.4)$$

Pour chaque nœud $n_b \in SN_a$, $ETX_{n_a \rightarrow n_b}$ représente la valeur *ETX* entre n_a et n_b , l'énergie résiduelle actuelle du nœud n_b est notée RE_b , IE_b représente son énergie initiale et $Dist(n_b, BS)$ est la distance entre le nœud n_b et la station de base. La fonction de coût exécutée par le nœud source et les nœuds intermédiaires pour sélectionner le saut suivant est définie par l'équation (4.5).

$$cost(n_a, n_b) = \alpha \left[1 - \frac{Dist(n_b, BS)}{r} \right] + \beta \left[1 - \frac{ETX_{n_a \rightarrow n_b}}{4} \right] + \gamma \left[1 - \frac{RE_b}{IE_b} \right]^{(-1)} \quad (4.5)$$

$$\text{où } \alpha + \beta + \gamma = 1$$

où α , β et γ sont des coefficients de pondération respectivement pour la distance, la valeur *ETX* et l'énergie restante. Dans le protocole LQLB-MGR, lorsque les valeurs de ces coefficients sont modifiées par simulation, nous avons constaté que :

- Pour avoir une meilleure fiabilité : $\alpha \geq \beta > \gamma$,
- Pour avoir une durée de vie du réseau plus élevée : $\gamma > \beta > \alpha$,
- Pour optimiser les performances QoS : $\alpha > \gamma > \beta$.

Pour cela, ces coefficients ci-dessus sont fixées comme suit

$$\alpha = 0.5, \quad \beta = 0.15 \quad \text{et} \quad \gamma = 0.35.$$

Après avoir sélectionné les candidats disponibles (voisins non impliqués dans aucun autre chemin de routage) pour la transmission selon l'équation 4.4, la fonction de coût définie dans l'équation 4.5 est calculée pour chacun de ces noeuds voisins. Ainsi, LQLB-MGR sélectionne le voisin ayant le score le plus élevé comme nœud "saut suivant". Si un tel nœud ne peut pas être trouvé, le nœud courant est défini comme un nœud bloqué. Dans ce cas, LQLB-MGR exécute la stratégie de recul et de marquage (step back & mark) comme dans [76]. Dans cette stratégie, le nœud actuel est marqué comme un nœud bloqué et reviendra à son saut précédent. Le nœud de saut précédent essaie de sélectionner un autre nœud disponible qui n'a pas le status "bloqué" parmi ses voisins pour le choisir comme saut suivant. LQLB-MGR continue à exécuter la stratégie de recul et de marquage jusqu'à ce que cette situation ne se produise pas et par la suite il reviendra à la première stratégie.

L'algorithme 3 présente la première phase du protocole LQLB-MGR dans laquelle il découvre plusieurs chemins à nœuds-disjoints entre le nœud source et la station de base.

Algorithm 3 : Découverte de chemins à nœuds-disjoints du noeud source S

```

1: Begin
   /* Au début, tous les nœuds sont libres */
   - S : nœud source;
   - D : station de base;
   -  $CN_a$  : nœud courant;
2:  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 0.15$ ,  $\gamma = 0.35$ ;
3:  $CN_a = S$ ;
4: Trouver  $SN_a(CN_a)$  /* l'ensemble des voisins de  $CN_a$  */
5: if  $SN_a \neq \emptyset$  then
6:   for chaque nœud  $n_b \in SN_a$  do
7:     Calculer le coût de routage en fonction de l'équation ( 4.5);
8:   end for
9:   Sélectionner  $n_b$  qui a le plus grand coût comme saut suivant pour le nœud courant
    $CN_a$ ; /* Changer l'état de  $CN_a$  vers occupé (OCCUPIED) */
10:   $status(CN_a) = OCCUPIED$  /* Le nœud  $n_b$  devient le nœud courant  $CN_a$  */
11:   $CN_a \leftarrow n_b$ ;
12: else
13:   $status(CN_a) = BLOCKED$ ; /* Libellé  $CN_a$  comme bloqué (BLOCKED) */
14:  Revenir au prédécesseur de  $CN_a$ ;
15: end if
16: Répéter les étapes de 5 à 16 jusqu'à ce que  $CN_a$  soit la station de base;
17: Retourner le chemin trouvé;
18: Répéter les étapes de 3 à 18 pour trouver tous les chemins à nœuds-disjoints;
19: End

```

b) Équilibrage de charge (calcul des coûts des chemins)

Similaire au protocole de routage "Maximal Minimal Residual Energy-AOMDV (MMRE-AOMDV)" [107], le protocole LQLB-MGR trie tous les chemins de routage trouvés entre le noeud source et la station de base par ordre décroissant en terme d'énergie résiduelle nodale, et transmet les paquets de données à travers le chemin ayant l'énergie résiduelle

nodale maximale. LQLB-MGR calcule le nombre maximal de paquets de données que chaque chemin peut le transmettre, à condition que la bande passante maximale ne soit pas dépassée. Le calcul du coût d'un chemin se fait selon les étapes suivantes :

- Trouver le chemin qui a l'énergie résiduelle nodale minimale parmi les chemins disjoints sélectionnés selon l'équation (4.6) comme dans [108].

$$RE(P_j) = \text{Min}_{i \in m} RE_{ij} \quad (4.6)$$

où RE_{ij} est l'énergie résiduelle du nœud i appartenant au chemin j , $RE(P_j)$ représente l'énergie résiduelle nodale du chemin j et m est le nombre de sauts dans le chemin j .

- Calculer le nombre maximal de paquets de données pouvant être transmis via le chemin j noté (NP_j) selon l'équation (4.7) :

$$NP_j = \frac{RE(P_j)}{E_c} \quad (4.7)$$

où E_c est l'énergie consommée pour transmettre un paquet via un chemin de routage. Il est exprimé par l'équation (4.8) :

$$E_c = \sum_{i=1}^m (E_{rx}(k) + E_{tx}(k, d)) \quad (4.8)$$

où $E_{rx}(k)$ représente la consommation d'énergie pour recevoir k octets (comme décrit dans l'équation (4.2)), $E_{tx}(k, d)$ est la consommation d'énergie pour transmettre k octets (comme présenté par l'équation (4.1)) et m représente le nombre de sauts dans le chemin (du nœud source à la station de base).

- Choisir le chemin qui a le NP_j le plus élevé pour transférer les paquets de données et diminuer de un la valeur de NP_j du chemin sélectionné selon l'équation (4.9).

$$NP_j = NP_j - 1 \quad (4.9)$$

- Répéter les deux dernières étapes jusqu'à ce que le processus de transmission soit terminé.

c) Étapes du protocole LQLB-MGR

Le protocole proposé est exécuté en fonction des étapes suivantes :

1. Étape 1 : Collecte des données multimédias (images dans notre cas) à partir de l'environnement de détection, puis division de ces données collectées en plusieurs paquets.
2. Étape 2 : Le nœud source construit plusieurs chemins disjoints vers la station de base selon les métriques suivantes : distance, valeur de "ETX" et énergie restante.

3. Étape 3 : Tri les chemins trouvés par ordre décroissant en terme d'énergie résiduelle nodale, et transfert des paquets à travers le chemin qui a le score le plus élevé.
4. Étape 4 : La station de base reconstruit les données multimédias reçues.

4.2.6 Evaluation des performances

Dans cette section, les performances du protocole de routage géographique multi-chemin de qualité de lien et d'équilibrage de charge (LQLB-MGR) sont évaluées et les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus par d'autres protocoles.

a) Environnement de travail

Les simulations sont réalisées à l'aide du simulateur OMNeT++ [101] version 4.6 et du framework Castalia version 3.2. Le nombre de nœuds déployés dans le réseau varie de 200 à 600. Ces nœuds sont stationnaires et déployés de manière aléatoire dans un champ de détection d'une superficie de 800 m x 600 m. Le nœud source est situé au point de coordonnées (50,50) et le nœud puits est situé en point de coordonnées (750,550) de la région. Nous avons réalisé les simulations en fonction des paramètres présentés dans le tableau 4.1. Pour chaque scénario nous avons exécuté la simulation 10 fois et nous avons calculé la valeur moyenne de chaque métrique de performance en fonction des résultats obtenus.

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation (LQLB-MGR)

Paramètre	Valeur
Zone de déploiement	800m x 600m
Nombre de nœuds	200, 300, 400, 500, 600
Position de la station de base	(750,550)
Portée radio maximale	60m
Protocole MAC	IEEE 802.15.4
Taille des paquets	1024 octets
Énergie initiale des nœuds	50 J
Qualité de lien ETX	1-4 aléatoire
E_{elec}	$5 \mu J/b$
ε_{amp}	$1 \eta J/b$
Temps de simulation	400 secondes

b) Résultats de simulation

Dans cette sous-section, nous évaluons les protocoles LQLB-MGR, TPGF, LQEAR et EEMGR en termes de nombre de paquets perdus, taux de paquets reçus par la station de base "PDR", nombre de sauts, durée de vie du réseau et délai de bout en bout et nous comparons les résultats obtenus.

Nombre de paquets perdus

La figure 4.1 présente le nombre de paquets perdus dans les protocoles de routage TPGF, LQEAR, EEMGR et LQLB-MGR. Nous observons que dans le protocole TPGF, le nombre de paquets perdus est très grand que dans les autres protocoles vu que ce dernier sélectionne le prochain saut pour relayer un paquet en fonction uniquement de la distance qui le sépare de la station de base sans qu'il tienne compte de la qualité du lien et par conséquent les chemins ayant des liens avec une mauvaise qualité ne peuvent pas être éventuellement évités lors du processus de découverte des chemins. Cependant, dans LQEAR, le nombre de paquets perdus est plus ou moins réduit par rapport à celui dans TPGF car LQEAR implique la qualité de lien (LQI), l'énergie restante et la distance dans la décision de routage. En outre, EEMGR a un plus petit nombre de paquets perdus par rapport à TPGF et LQEAR car ce dernier implique la valeur ETX dans la fonction de coût utilisée pour sélectionner le saut suivant. La valeur ETX est plus précise que la valeur LQI utilisée dans LQEAR. Dans LQLB-MGR, le nombre de paquets perdus est très réduit par rapport aux trois protocoles grâce à l'utilisation de la métrique ETX comme métrique de qualité de lien qui permet à sélectionner les liens de communication les plus fiables. De plus, LQLB-MGR exécute une stratégie d'équilibrage de charge basée sur l'énergie résiduelle de chaque nœud de capteur dans le chemin de routage sélectionné. Ces deux métriques permettent de sélectionner les meilleurs chemins en termes d'énergie ce qui minimise le nombre de paquets perdus.

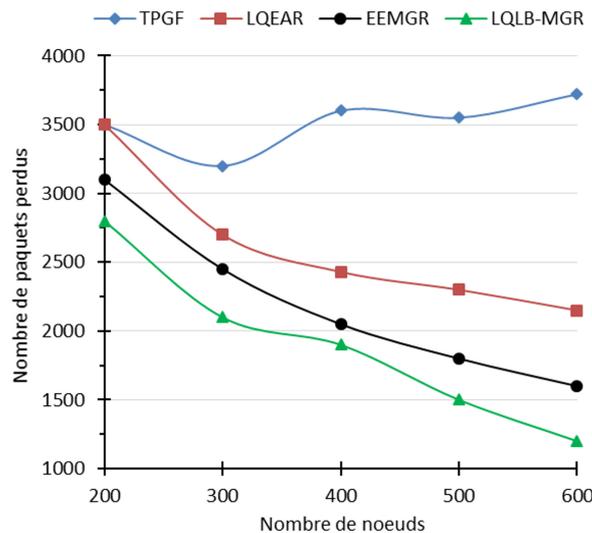


FIGURE 4.1 – Nombre moyen de paquets perdus

Taux de paquets délivrés à la station de base (PDR)

Le taux de paquets délivrés à la station de base (PDR) présente le rapport entre les paquets de données délivrés avec succès à la station de base et ceux produits par le nœud source. La figure 4.2 illustre le taux moyen de paquets délivrés à la station de base des protocoles TPGF, LQEAR, EEMGR et LQLB-MGR. Cette figure montre que le PDR moyen dans LQLB-MGR est plus grand que dans les autres protocoles. Cela est dû à la construction de chemins disjoints en utilisant la métrique ETX, l'énergie restante des voisins et la distance pour sélectionner le meilleur voisin comme saut suivant. De plus, cette

performance est justifiée puisque dans notre proposition le choix des meilleurs chemins est basé sur l'énergie résiduelle nodale minimale et donc la réduction de la défaillance des nœuds ce qui implique moins de perte de paquets. Le protocole EEMGR a un PDR plus grand que les protocoles TPGF et LQEAR puisque ce dernier utilise la métrique ETX combinée avec la distance et l'énergie dans la fonction de coût pour sélectionner des chemins fiables contrairement au protocole LQEAR qui implique la métrique LQI avec la distance et l'énergie résiduelle des nœuds pour établir les chemins entre un nœud source et la station de base. Par ailleurs, la métrique LQI ne peut pas classer avec précision les liens de mauvaise qualité et de bonne qualité en raison de la variance élevée qu'elle utilise dans son estimation.

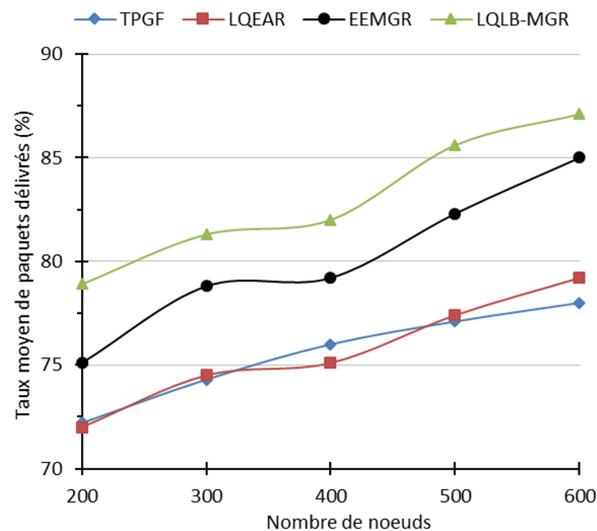


FIGURE 4.2 – Taux moyen de paquets délivrés à la station de base

Nombre de sauts

La figure 4.3 présente le nombre moyen de sauts dans les chemins de routage sélectionnés dans LQLB-MGR, TPGF, LQEAR et EEMGR. Comme le montre la figure 4.3, nous observons que le protocole TPGF a le plus petit nombre de sauts dans ses chemins trouvés en raison de sa stratégie de découverte de chemins utilisée qui implique seulement la distance entre les nœuds voisins et la station de base. Nous observons également que LQEAR, EEMGR et LQLB-MGR découvrent des chemins avec plus de nombres de sauts puisque LQEAR et EEMGR sélectionnent des chemins les plus fiables et LQLB-MGR découvre les chemins les plus fiables et les plus écoénergétiques.

Durée de vie du réseau

La durée de vie du réseau représente le nombre de périodes avant que l'un des nœuds épuise son énergie.

La figure 4.4 présente la durée de vie moyenne du réseau pour les quatre protocoles de routage. Comme illustré dans la figure 4.4, LQLB-MGR atteint une durée de vie du réseau plus élevée par rapport aux trois autres protocoles en raison de l'équilibrage de charge entre les chemins sélectionnés en termes de consommation d'énergie (énergie nodale minimale), ce qui implique que les chemins découverts sont utilisés de manière

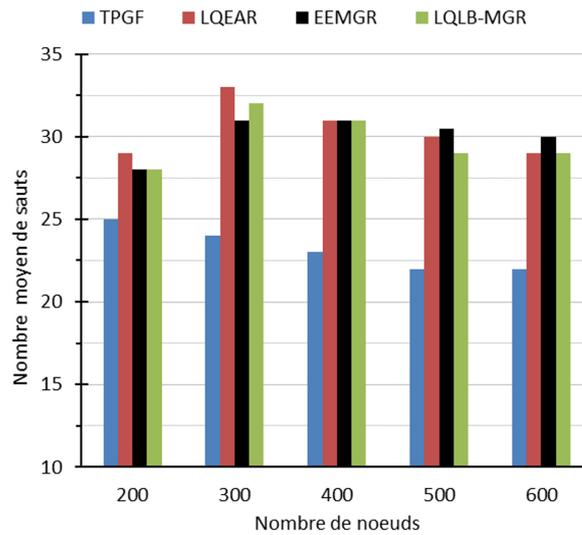


FIGURE 4.3 – Nombre moyen de sauts

optimale pour transmettre des données et ainsi éviter l'épuisement rapide des batteries des nœuds. Nous constatons que pour les protocoles LQEAR, EEMGR et LQLB-MGR, la durée de vie du réseau augmente avec l'augmentation du nombre de nœuds puisqu'il y a plus de nœuds disponibles et donc plus de choix.

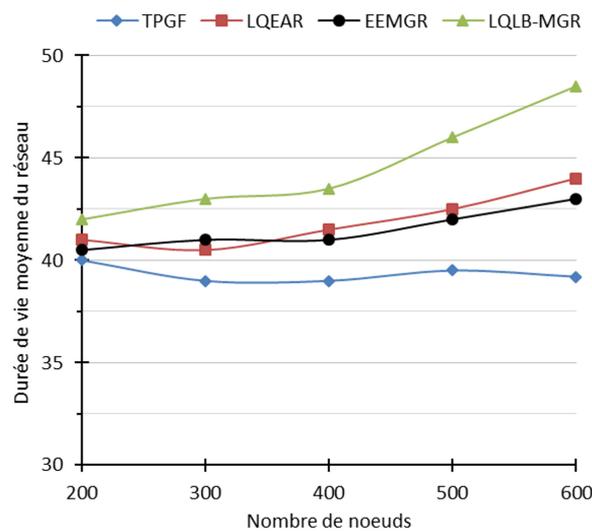


FIGURE 4.4 – Durée de vie moyenne du réseau

Délai moyen de bout en bout

Le délai de bout en bout est le temps nécessaire pour délivrer un paquet de données avec succès du nœud source au nœud destinataire.

Comme illustré dans la figure 4.5, nous observons que le protocole TPGF a le plus petit délai moyen de bout en bout puisqu'il découvre des chemins de routage avec une plus grande distance, et donc avec un plus petit nombre de sauts. La figure 4.5 montre quasiment le même délai pour les protocoles LQEAR et EEMGR puisqu'ils utilisent une

métrique de qualité de lien combinée à la distance et à l'énergie restante pour sélectionner les chemins. LQLB-MGR a le délai moyen de bout en bout le plus élevé par rapport aux trois autres protocoles de routage, car il transmet les paquets de données à travers les chemins les plus fiables et ces chemins peuvent impliquer un grand nombre de nœuds relais entre le nœud source et la station de base.

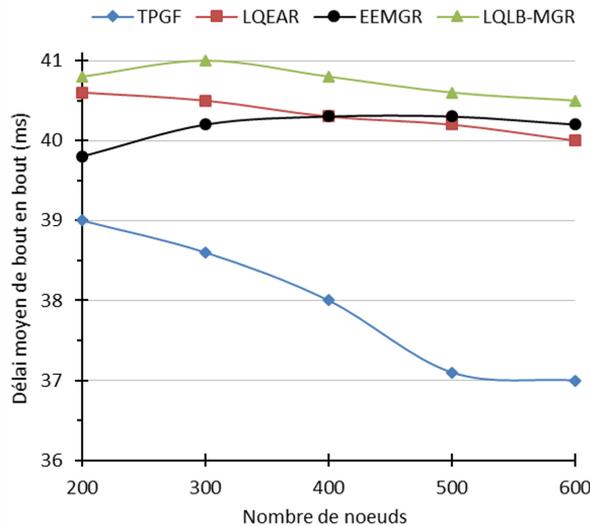


FIGURE 4.5 – Délai moyen de bout en bout

4.3 Contribution 2 : le protocole GCGM

4.3.1 Contexte

Le routage géographique est l'une des stratégies de routage les plus efficaces dans les RCMSFs. Dans cette stratégie de routage, chaque nœud stocke uniquement les informations de ses voisins à un saut au lieu de la topologie globale du réseau ce qui réduit considérablement les coûts associés au partage d'informations. La stratégie de transmission la plus célèbre dans le routage géographique est la transmission gloutonne, dans laquelle les décisions de routage sont prises localement en fonction des informations du voisinage à un saut [52]. La transmission gloutonne sélectionne un nœud comme saut suivant, soit celui qui est le plus proche de la station de base parmi les voisins (distance-based), soit celui avec le plus petit angle de déviation avec la ligne entre la source et la destination (direction-based). La première stratégie réduit le nombre de sauts dans un chemin de routage tandis que la seconde réduit la distance spatiale entre le nœud source et la station de base. Le routage glouton basé sur la distance a un grand impact sur la sélection des nœuds fiables tandis que la stratégie de routage gloutonne basée sur la direction permet d'augmenter la stabilité des chemins vers la station de base. A cet effet, nous avons proposé un nouveau schéma de routage multi-chemin basé sur la localisation appelé "GCGM". GCGM combine à la fois les deux stratégies de routage gloutonnes (distance-based et direction-based). GCGM attribue à chaque nœud candidat comme saut suivant un coefficient de pondération pour chacune des deux stratégies.

4.3.2 Hypothèses

Nous supposons que le réseau se compose d'un nombre fixé (N) de nœuds qui sont déployés de manière aléatoire dans l'environnement de détection souhaité où chaque nœud se voit attribuer un identifiant unique. Chaque nœud de capteur du réseau est stationnaire et connaît sa propre localisation géographique. Tous les nœuds sont équipés d'une radio ayant une portée de transmission (r) et peuvent échanger des données avec leurs voisins directs. Nous considérons un seul nœud source (S) et une station de base (D), et tous les nœuds ont les mêmes caractéristiques en termes de puissance de batterie et d'espace mémoire à l'exception du nœud source et la station de base. Chaque nœud de capteur peut être dans l'un des états suivants :

- LIBRE : le nœud n'appartient à aucun chemin déjà trouvé.
- OCCUPE : le nœud est déjà sélectionné dans un chemin.
- BLOQUE : le nœud n'a pas de voisins vers la station de base.
- MORT : le nœud a épuisé toute sa batterie.

Soit (x_a, y_a) les coordonnées du nœud N_a et (x_b, y_b) les coordonnées du nœud N_b . La distance euclidienne entre N_a et N_b notée $Dist(N_a, N_b)$ est définie par l'équation (4.10).

$$Dist(N_a, N_b) = \sqrt{(x_{N_a} - x_{N_b})^2 + (y_{N_a} - y_{N_b})^2} \quad (4.10)$$

4.3.3 Division des données multimédias

Notre protocole utilise le schéma de compression JPEG pour les données multimédias afin de réduire la quantité de données transmises. Il divise les données multimédias collectées en paquets dont la taille est prise en charge par la couche physique de la technologie sans fil utilisée. Chaque paquet contient plusieurs informations : "Source-ID" indique l'identifiant du nœud source, "Path-ID" représente le chemin par lequel le paquet sera transmis et "Payload" est une fraction de données multimédias (données multimédias partielles) comme illustré dans la figure 4.6.

4.3.4 Le protocole GCGM

La plupart des protocoles de routage géographique utilisent la transmission gloutonne pour sélectionner le prochain saut en appliquant l'une de ses deux stratégies : stratégie gloutonne (greedy) ou stratégie boussole (compass). La stratégie gloutonne sélectionne le voisin le plus proche de la station de base comme prochain saut pour minimiser le nombre de sauts tandis que la stratégie de boussole sélectionne comme prochain saut, le voisin qui fait un angle minimum de la ligne virtuelle entre le nœud source et la station de base pour réduire la distance spatiale. Ainsi, l'approche gloutonne a un impact majeur sur la sélection des nœuds fiables et la réduction du nombre de sauts, et la stratégie de la boussole permet de maximiser la stabilité des chemins vers la station de base. Le protocole proposé "GCGM" combine les deux stratégies (gloutonne et boussole) avec des poids attribués pour ces deux stratégies afin de sélectionner le saut suivant parmi les voisins directs. Nous avons combiné ces deux stratégies afin de bénéficier de leurs avantages et permettre le choix du meilleur prochain saut.

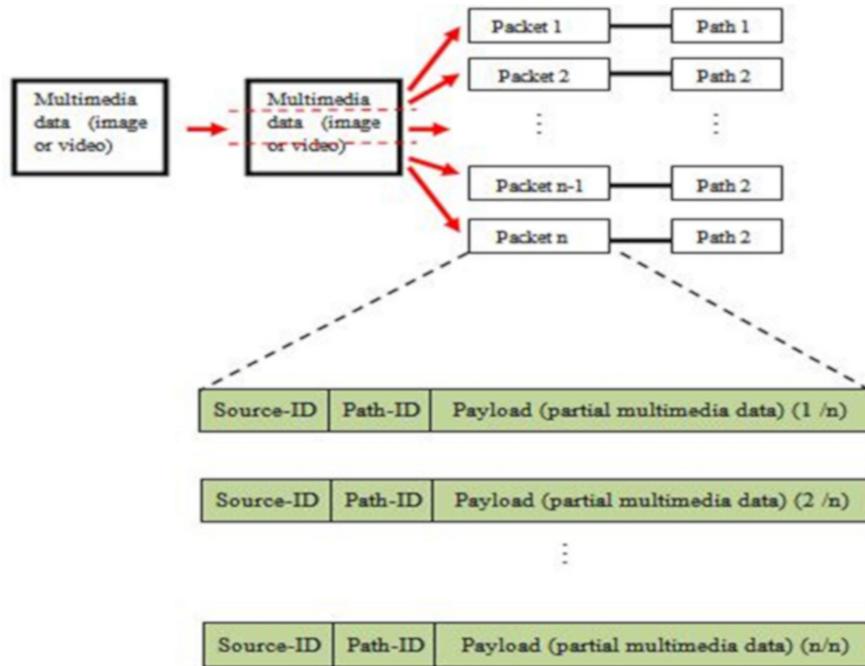


FIGURE 4.6 – Division des données multimédias

a) Découverte des chemins disjoints

Notre objectif est de construire plusieurs chemins de routage disjoints où aucun lien ou nœud n'est partagé entre les chemins trouvés à l'exception du nœud source et de la station de base, comme illustré sur la figure 4.7. Ce type de schéma de routage est généralement requis par de nombreuses applications en raison de l'indépendance des chemins alternatifs, l'utilisation des ressources réseau les plus disponibles et parce qu'il garantit la tolérance aux pannes. De plus, ce schéma de routage assure l'équilibrage de charge dans le réseau et la fiabilité de la transmission des données.

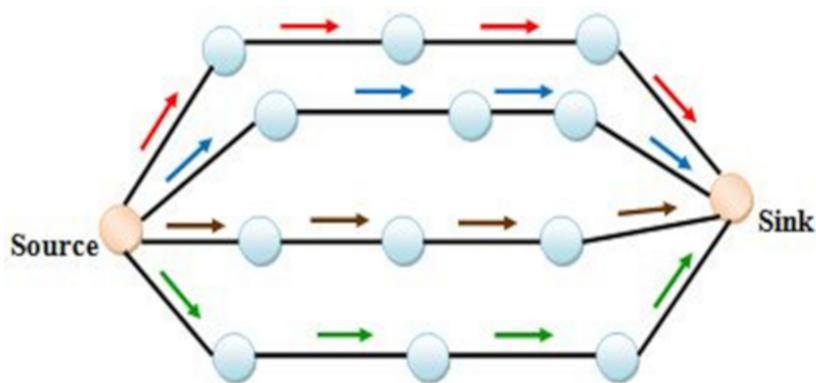


FIGURE 4.7 – Exemple de plusieurs chemins à nœuds-disjoints

Dans la première phase de la procédure de découverte de chemins, le nœud source diffuse un paquet de contrôle "PROB" dans son voisinage. Un nœud voisin (saut suivant) sélectionné diffuse à son tour le paquet PROB reçu dans son voisinage pour trouver un nœud relais (saut suivant), et le même processus se poursuit jusqu'à ce que la station de

base soit atteinte.

Le paquet PROB contient plusieurs informations comme le montre la figure 4.8. Il est identifié par les paramètres suivants : "Source-ID", "Sink-ID" et "Seq-Num", où "Source-ID" représente l'ID du nœud source, "Sink-ID" est l'ID de la station de base, et "Seq-Num" indique le numéro de séquence. "Source-Pos" et "Sink-Pos" indiquent respectivement l'emplacement géographique du nœud source et de la station de base. Ces cinq attributs sont des attributs fixés dans un paquet PROB et ils sont définis par le nœud source. Ils ne sont pas modifiés que lors de la propagation de ce paquet dans le réseau. Lorsqu'un nœud intermédiaire diffuse un paquet PROB, il ne modifie que les attributs variables : "Hop-Count", "Previous-Hop" et "Absolute-Pos". "Hop-Count" est le nombre de sauts du nœud source au nœud courant, "Previous-Hop" désigne l'ID du nœud courant et "Absolute-Pos" contient les coordonnées absolues du nœud courant.

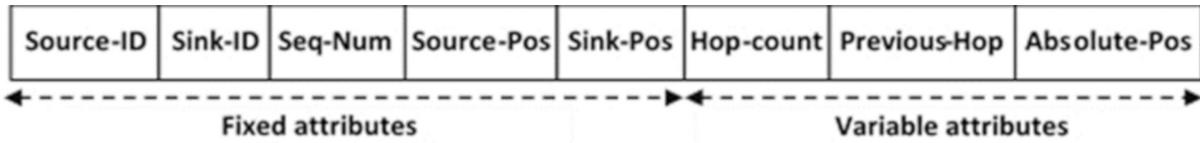


FIGURE 4.8 – Format du paquet PROB

Après l'expiration du délai prédéfini, le nœud recevant un paquet PROB calcule la distance qui le sépare de la station de base à l'aide de l'équation (4.10) ainsi que sa direction vers la station de base selon l'équation (4.11). L'angle de direction θ_k est défini comme l'angle entre la ligne reliant le nœud actuel (S) (le nœud émetteur du paquet PROB) et la station de base (D) avec la ligne reliant le nœud actuel et le voisin (P) comme illustré sur la figure 4.9. En outre, comme c'est montré par la figure 4.9, lorsque le nœud (P) reçoit un paquet PROB de son nœud précédent (S), $Dist_{S,P}$, $Dist_{P,D}$ et $Dist_{S,D}$ peuvent être calculées en fonction de sa position (x_P, y_P) , de la position du nœud source $S(x_S, y_S)$ et celle de station de base $D(x_D, y_D)$, qui sont contenus dans le paquet PROB. Ensuite, l'angle θ_k peut être calculé par le nœud (P) comme présenté dans l'équation (4.11).

$$\theta_k = \arccos\left(\frac{Dist_{P,D}^2 + Dist_{S,D}^2 - Dist_{S,P}^2}{2 * Dist_{P,D} * Dist_{S,D}}\right) \quad (4.11)$$

De plus, chaque nœud récepteur du paquet PROB (P dans la figure 4.9) génère un paquet appelé "paquet INFO" et le transmet au nœud émetteur du paquet PROB (S dans la figure 4.9). Les informations contenues dans le "paquet INFO" sont représentées dans la figure 4.10. Le "paquet INFO" est identifié par : "Sender-ID" et "Receiver-ID" qui indiquent respectivement l'identifiant du nœud émetteur (le nœud qui envoie le paquet PROB (S)) et l'identifiant du nœud récepteur. Ce paquet contient également les informations suivantes : "Distance", "Angle" et "RE" où "Distance" représente la distance entre le nœud récepteur du paquet PROB et la station de base, "Angle" est la direction du nœud récepteur vers la station de base et "RE" est l'énergie restante du nœud récepteur.

$$Cost(N_i) = w_1 * \left(\left(\frac{Dist(N_i, D)}{r}\right)^{\alpha_i} + \left(\frac{|\theta_i|}{90^\circ}\right)^{\beta_i}\right) + (-w_2) * \left(\frac{RE_i}{IE_i}\right) \quad (4.12)$$

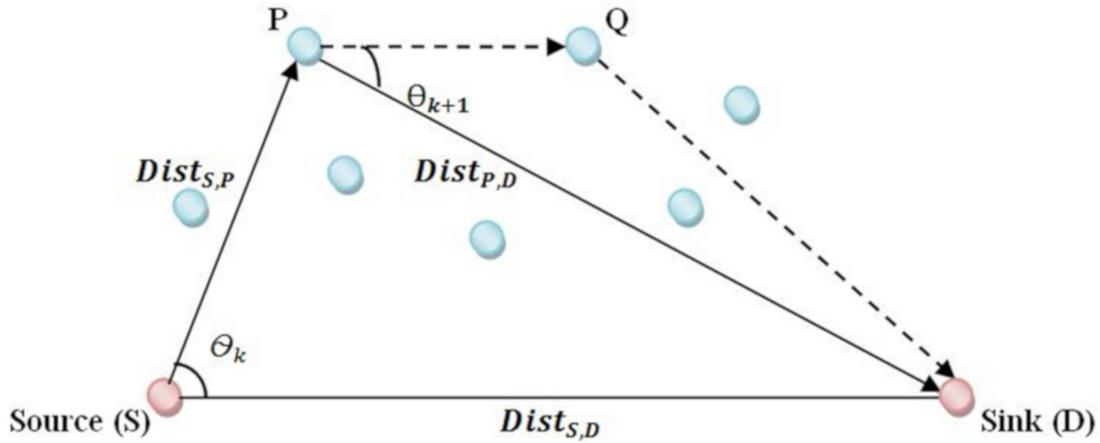


FIGURE 4.9 – Distance et direction du prochain saut (le nœud candidat) vers la station de base

Sender-ID	Receiver-ID	Distance	Angle- θ	RE
-----------	-------------	----------	-----------------	----

FIGURE 4.10 – Format du paquet INFO

où $w_1 + w_2 = 1$

$$\alpha_i = \frac{r * |\theta_i|}{(90 * Dist_{N_i,D}) + (r * |\theta_i|)} \quad (4.13)$$

où $\beta_i = 1 - \alpha_i$

Où $Dist(N_i, D)$ désigne la distance entre le nœud voisin N_i et la station de base (D), r est la portée de transmission, θ_i est la direction du nœud N_i , RE_i et IE_i représentent respectivement l'énergie restante et l'énergie initiale du nœud voisin N_i .

Les poids des nœuds candidats ($Cost(N_i)$) sont représentés en fonction de la distance par rapport à la station de base, de la direction vers la station de base et de l'énergie restante du nœud. Dans l'équation (4.12), w_1 et w_2 sont des coefficients de pondération respectivement pour la distance et la direction du nœud, et l'énergie restante. Dans le protocole GCGM, w_1 et w_2 sont respectivement égaux à 0,7 et 0,3 pour satisfaire l'optimisation des performances de la QoS.

α_i et β_i représentent les poids proposés pour la distance et la direction pour le nœud voisin N_i calculés respectivement selon l'équation (4.13). Dans l'équation (4.12), pour chaque voisin candidat N_i , lorsque α_i est petit cela signifie que le voisin est éloigné de la station de base et a un petit angle de déviation vers la station de base, le terme de direction domine le terme de distance ce qui implique que la stratégie de routage fonctionne comme un protocole basé sur la direction (Compass), tandis que lorsque α_i est grand, cela signifie que le nœud candidat est proche de la station de base et a un grand angle de déviation vers la station de base, le terme de direction de l'équation (4.12) est négligeable ce qui implique que le schéma de routage fonctionne comme un protocole basé sur la distance (Greedy). Cependant, lorsque les valeurs α_i et β_i sont presque égales, il s'agit en fait d'un schéma de routage hybride dans lequel les stratégies de transmission basées sur la distance

et basées sur la direction sont combinées. Pour construire un chemin de routage, GCGM peut utiliser la stratégie basée sur la distance, ou la stratégie basée sur la direction ou bien une stratégie hybride en fonction de la distance et de la direction de chaque nœud voisin vers la station de base.

Une fois que le nœud N_i est sélectionné comme prochain saut, il diffuse le paquet PROB à ses voisins à un saut et ainsi de suite jusqu'à ce que la station de base soit atteinte. Lorsque le paquet PROB arrive à la station de base, celle-ci diffuse immédiatement un paquet de notification pour conclure le processus de découverte de chemin. De plus, lorsqu'un nœud voisin N_i est sélectionné comme prochain saut, il change son état de "libre" vers "occupé", ce qui signifie qu'il ne peut pas être choisi comme prochain saut pour d'autres chemins, ce qui garantit que tous les chemins découverts sont disjoints.

b) Contournement des trous

Pendant le processus de découverte de chemins, si un nœud ne peut pas sélectionner un voisin comme prochain saut, ce nœud est défini comme un nœud "bloqué" (comme le nœud (d) dans la figure 4.11), et cette situation est appelée situation de blocage (voir figure 4.11). Dans ce cas, le protocole GCGM exécute la stratégie de retour et de marquage proposée dans [76]. Dans cette stratégie, quand un nœud est en face d'un trou de routage (zone vide), il est marqué comme un nœud "bloqué" et reviendra à son saut précédent. Le nœud du saut précédent essaiera de trouver un autre voisin "libre" parmi ses voisins afin d'être sélectionné comme saut suivant. GCGM continue d'exécuter la stratégie de retour et de marquage jusqu'à ce qu'un nœud trouve un saut suivant qui peut exécuter la transmission gloutonne.

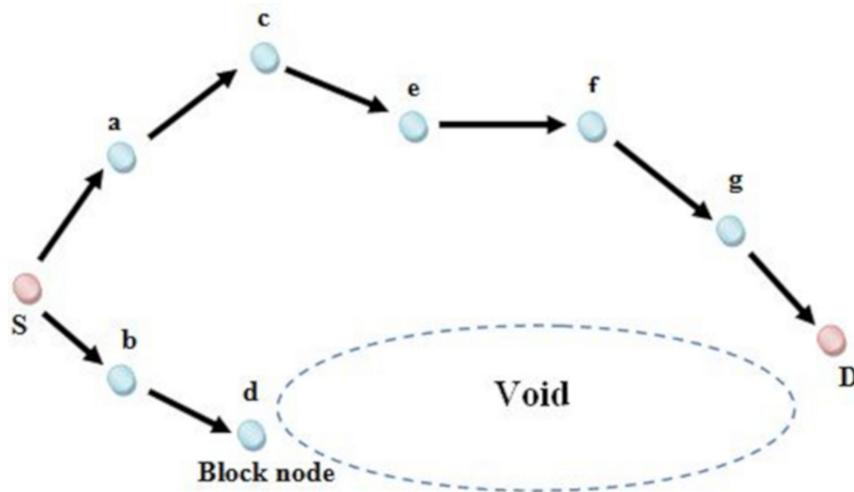


FIGURE 4.11 – Nœud bloqué et situation de blocage

c) Algorithme GCGM

La figure 4.12 présente le diagramme de l'algorithme GCGM. Étant donné que GCGM est un protocole de routage géographique, il a comme entrées : l'emplacement du nœud émetteur et l'emplacement du nœud récepteur. La description détaillée de l'algorithme GCGM est comme suit :

Tout d'abord, le nœud source vérifie si la station de base se trouve à proximité. Si c'est le cas, il construit le chemin de routage, sinon le nœud source choisit le nœud qui a le score le plus bas selon l'équation (4.12) parmi tous ses nœuds voisins ayant le status "libre". Le nœud choisi comme saut suivant répète le même processus de découverte de chemin que le nœud source. Ce processus est répété jusqu'à ce que la station de base soit atteinte. Une fois le chemin est établi, la station de base envoie un message ACK au nœud source. Ensuite, le nœud source commence à envoyer les données multimédias (images dans notre cas) via les chemins disjoints établis. De plus, lorsqu'un nœud est sélectionné comme prochain saut est un nœud ayant le status "bloqué", ce dernier effectuera l'algorithme de retour et de marquage proposé dans [76].

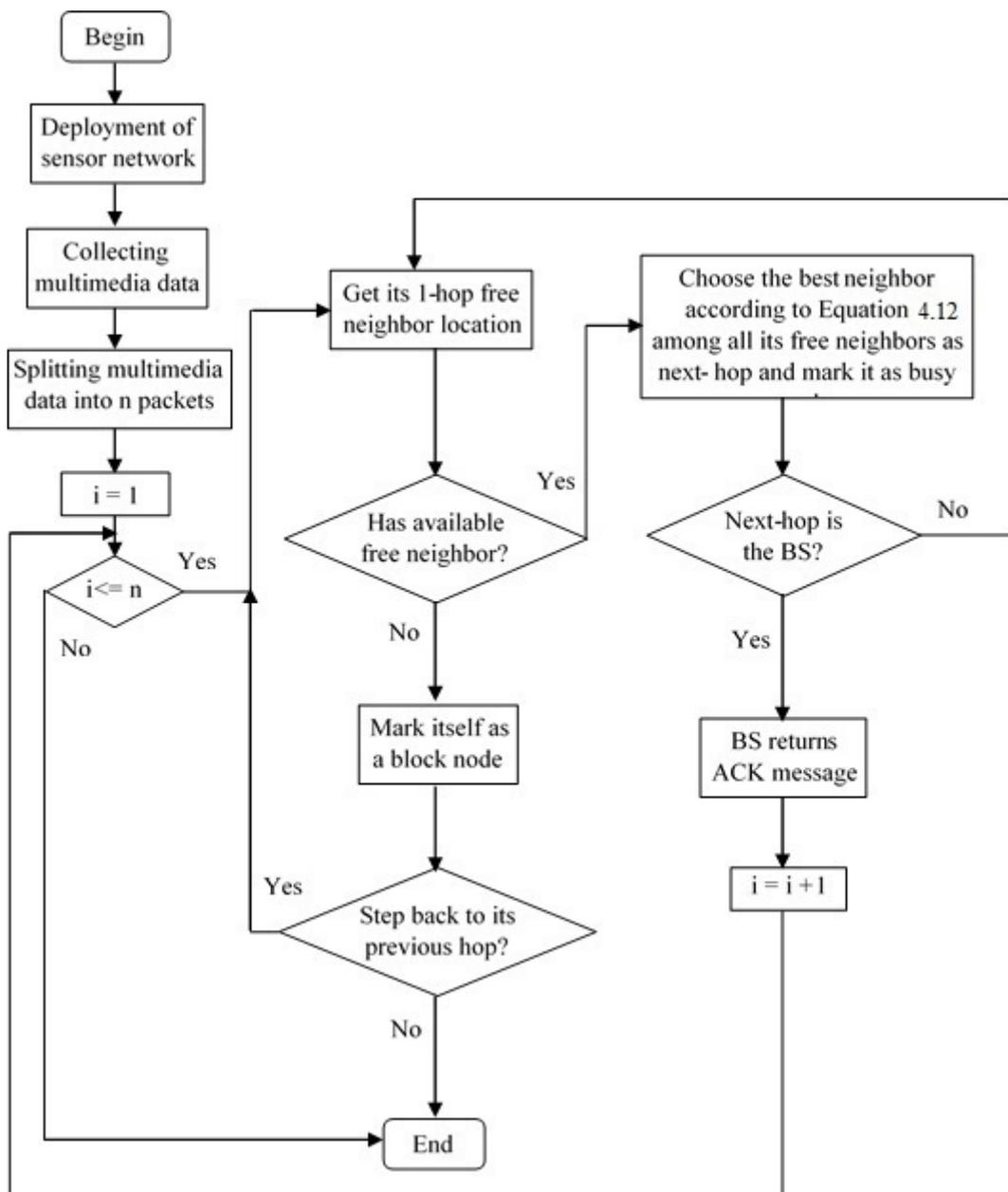


FIGURE 4.12 – Organigramme du protocole de routage GCGM

4.3.5 Evaluation des performances

Dans cette section, nous évaluons les performances du protocole GCGM dans différents scénarios et nous comparons les résultats obtenus avec d'autres protocoles.

a) Environnement de travail

Toutes les simulations ont été réalisées à l'aide du simulateur OMNeT++ [101] version 4.6 et Framework Castalia version 3.2. OMNeT++ est un simulateur à événement discret modulaire orienté objet ; il se compose de modules qui communiquent par passage de messages. OMNeT++ effectue la simulation avec une interface utilisateur graphique puissante. L'utilisation des fonctionnalités de traçage/débugage dans ce simulateur ne nécessite pas d'écrire un code supplémentaire par le programmeur. Tous ces caractéristiques rend le simulateur OMNeT++ un bon choix pour une utilisation dans la simulation des réseaux sans fil.

Dans les simulations, nous supposons que tous les nœuds de capteurs multimédias sont stationnaires et déployés d'une manière aléatoire dans une zone de détection de superficie 200 m x 200 m. Le nœud source est situé au point de coordonnées (10,100) et le nœud récepteur est situé au point de coordonnées (190, 100). Nous avons évalué les performances de routage pour une taille de réseau contenant : 30, 50, 90, 125 et 200 nœuds.

Pour chaque topologie, nous avons mesuré différents critères de performances à savoir l'énergie résiduelle moyenne, le délai de bout en bout, le taux de perte de paquets, le nombre de paquets reçus avec succès par la station de base, le nombre de nœuds morts, le nombre de sauts, la durée de vie du réseau, et la valeur de "Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)". Nous avons réalisé les simulations en fonction des paramètres de simulation qui sont résumés dans le tableau 4.2, en exécutant chaque scénario 10 fois, et nous avons calculé la valeur moyenne des résultats obtenus de chaque critère de performance.

TABLE 4.2 – Paramètres de simulation (GCGM)

Paramètre	Valeur
Zone de déploiement	200m x 200m
Nombre de noeuds sources	1
Nombre de nœuds	30, 50, 90, 125, 200
Position de la station de base	(190,100)
Position du noeud source	(10,100)
Portée de transmission	50m
Modèle de propagation radio	CC2420
Taille de paquet	1024 bits
Débit de données	250 kbps
Énergie initiale des noeuds	50 J
E_{elec}	$5 \mu J/b$
ε_{amp}	$1 \eta J/b$
Temps de simulation	400 secondes

b) Résultats de simulation

Dans cette sous-section, nous avons évalué le protocole proposé (GCGM) en termes de nœuds morts, nombre de paquets reçus par la station de base, taux de paquets délivrés (PDR), taux de perte de paquets, énergie résiduelle, délai de bout en bout, durée de vie du réseau et la valeur du PSNR pour différentes topologies. Nous avons comparé les résultats obtenus avec ceux obtenus par d'autres protocoles. Pour vérifier l'impact des poids α et β sur les performances du protocole GCGM, nous avons évalué le protocole GCGM avec des poids variables proposés pour la métrique distance (α_i) et la métrique direction (β_i) (GCGM avec les pondérations proposées) et nous l'avons évalué avec différentes pondérations statiques (α) et (β) : (1;0), (0.8;0.2), (0.5;0.5), (0.3;0.7) et (0;1). Lorsque α est égal à 1, cela signifie que GCGM se comporte comme un protocole basé sur la distance (GCGM basé sur la distance), lorsqu'il est égal à 0, GCGM se comporte comme un protocole basé sur la direction (GCGM basé sur la direction) et lorsque la valeur est comprise entre 0 et 1 GCGM fonctionne comme un protocole basé sur la distance et sur la direction (GCGM est hybride).

Nombre de nœuds morts

Un nœud de capteur est considéré comme nœud mort lorsqu'il épuise toute sa puissance énergétique (sa batterie) pendant la durée de vie du réseau. La figure 4.13 présente le nombre de nœuds morts pour le protocole GCGM avec des pondérations proposées et avec différentes pondérations statiques. À partir de la figure 4.13, nous pouvons constater que le protocole GCGM avec les pondérations proposées a le moins de nombre de nœuds morts par rapport aux GCGM basés sur la distance, GCGM basé sur la direction et GCGM avec des pondérations statiques. Ces performances fournies par GCGM avec des pondérations proposées se justifient par le fait que GCGM prend en compte l'énergie résiduelle en plus de la distance et de la direction avec les valeurs optimales des coefficients pour chaque nœud voisin pendant le processus d'établissement du chemin de routage contrairement à GCGM avec des pondérations statiques qui sont les mêmes pour tous les nœuds voisins. Contrairement au schéma GCGM basé sur la distance, qui ne prend en compte que la distance et contrairement au GCGM basé sur la direction qui ne prend en compte que la direction, cela signifie la sélection des mêmes nœuds lors de la construction des chemins ce qui implique l'épuisement de leur puissance énergétique rapidement. De plus, la figure 4.13 montre que GCGM avec des pondérations proposées est plus adapté aux réseaux denses. Lorsque le nombre de nœuds de capteurs est réduit dans le réseau, le nombre de nœuds morts augmente en raison de l'implication des mêmes nœuds de capteurs dans le processus d'acheminement des données vers la station de base.

Nombre de paquets reçus par la BS

La figure 4.14 illustre le nombre de paquets reçus au niveau de la station de base par chaque schéma de routage en fonction du nombre de nœuds utilisés dans différentes topologies. Comme illustré sur la figure 4.14, GCGM avec des pondérations proposées fournit plus de paquets de données à la station de base par rapport à tous les autres schémas de routage. Cela signifie que les performances de notre proposition dépendent des pondérations. GCGM avec des pondérations proposées fournit plus de paquets à la station de base en raison du nombre réduit de nœuds morts et grâce au choix du meilleur

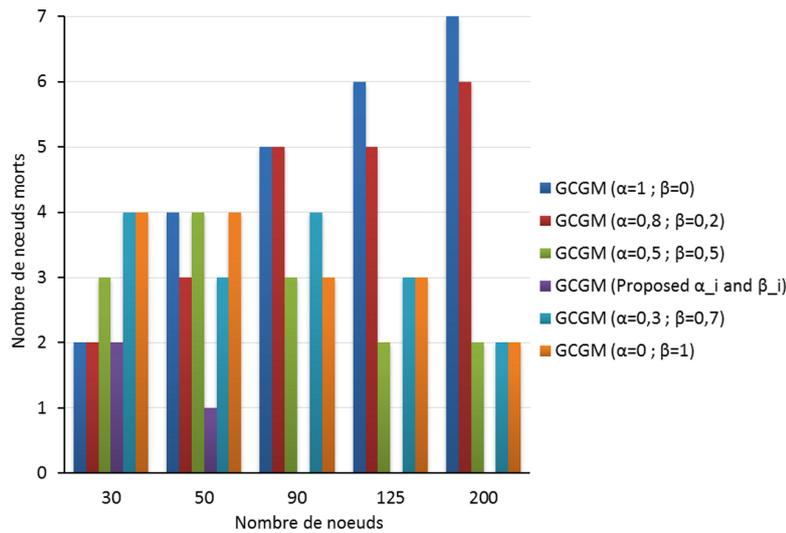


FIGURE 4.13 – Nombre de nœuds morts

voisin comme prochain saut parmi tous les différents voisins candidats puisque chaque nœud voisin a ses propres valeurs optimales. La figure 4.14 montre également que le schéma de routage basé sur la direction ($\alpha = 0$) délivre plus de paquets que le schéma de routage basé sur la distance ($\alpha = 1$).

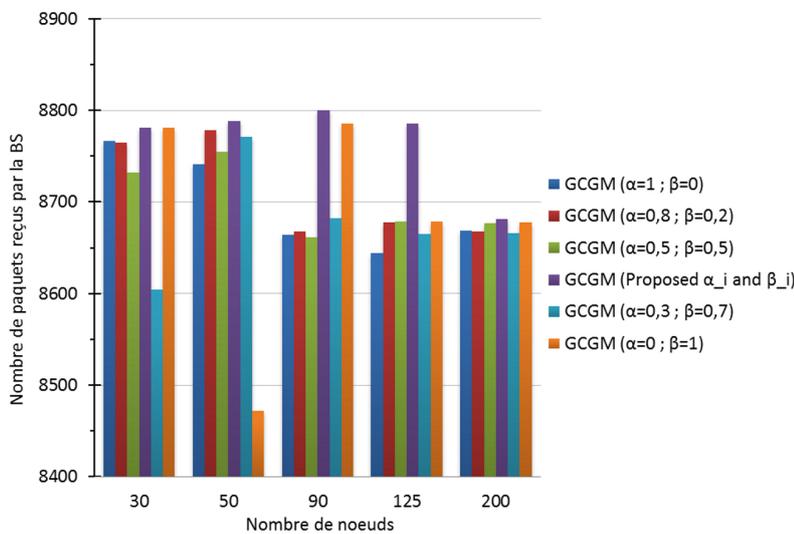


FIGURE 4.14 – Nombre de paquets reçus par la BS

Taux de paquets délivrés (PDR)

Le taux de paquets délivrés présente les mesures de performances du réseau les plus importantes pour l'évaluation d'un schéma de routage fiable. Cette mesure fournit le rapport entre les paquets reçus avec succès par la station de base et ceux produits par le nœud source. La figure 4.15 montre la valeur PDR pour notre proposition avec différentes valeurs de α . Nous pouvons clairement observer à partir de la figure 4.15 que pour toutes les topologies de réseau, le protocole GCGM avec des pondérations proposées a la meilleure

valeur PDR par rapport aux autres schémas de routage. En fait, la probabilité de collision et de congestion est moins causée. De plus, pour le schéma GCGM basé sur la distance, le PDR moyen est moins important en raison de l'augmentation du nombre de nœuds morts.

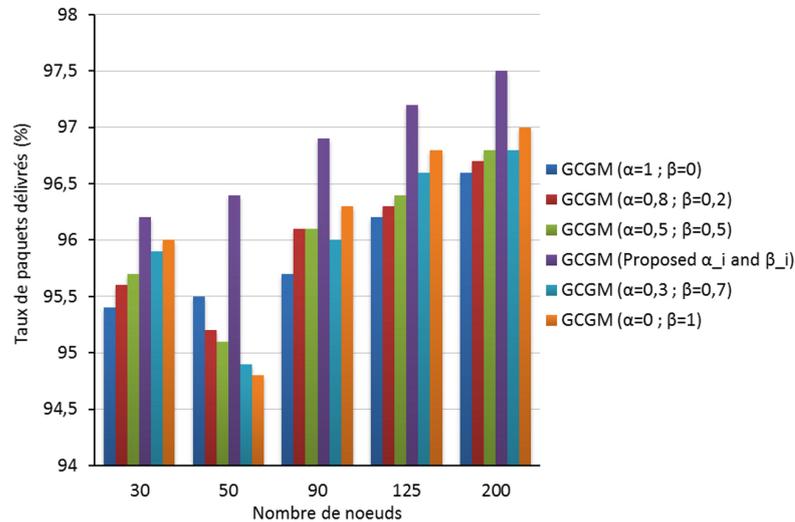


FIGURE 4.15 – Taux de paquets délivrés (PDR)

Nombre de sauts

Cette métrique représente le nombre moyen de nœuds intermédiaires d'un chemin par lequel les paquets de données doivent passer entre le nœud source et la station de base. La figure 4.16 présente le nombre de sauts moyen généré par chaque schéma de routage en fonction du nombre de nœuds de la topologie. Le nombre de sauts de tous les schémas de routage augmente quand le nombre de nœuds augmente. Les résultats montrent que le nombre de sauts du protocole GCGM avec des valeurs de pondérations qu'elles soient variables (proposées) ou statiques est inférieur que celui du protocole GCGM basé sur la direction, et supérieur à celui du protocole GCGM basé sur la distance. En effet, cela peut être expliqué par le fait que le schéma GCGM basé sur la distance (Greedy) cherche le prochain saut le plus proche de la station de base à chaque étape de construction de chemin de routage, ainsi des chemins avec un nombre de sauts plus petit sont sélectionnés. De plus, le schéma GCGM basé sur la direction (Compass) sélectionne le saut suivant en fonction de la direction et ignore la progression vers la station de base, donc un plus grand nombre de sauts est généré. Notre schéma de routage proposé utilise à la fois la distance et la direction et donne la priorité à chaque approche en fonction de la distance et de la direction de chaque voisin.

Taux de perte de paquets

Le taux de perte de paquets est la fraction du nombre total des paquets transmis qui ne sont pas arrivés à la destination. Dans les RCMSFs, les nœuds ont des contraintes de ressources en termes de puissance énergétique et d'espace mémoire, ce qui implique qu'une perte de paquets peut se produire en raison de la taille limitée du buffer des nœuds

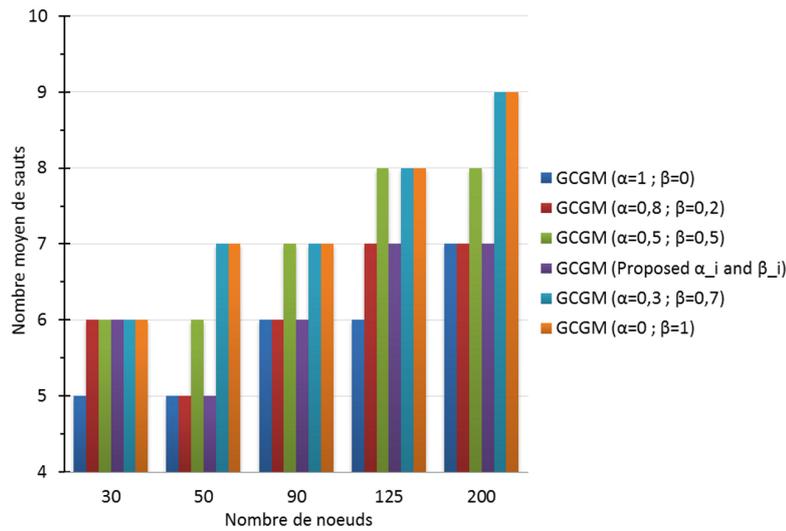


FIGURE 4.16 – Nombre moyen de sauts

ou de la mort des nœuds. La figure 4.17 présente le taux de perte de paquets pour tous les scénarios du schéma de routage proposés. Les résultats montrent que GCGM avec les valeurs de poids proposées réduit de manière significative le taux de paquets perdus en raison du nombre réduit de nœuds morts, par rapport aux autres schémas de routage. Dans les autres schémas de routage, le nombre de nœuds morts est augmenté en raison de leur surutilisation (épuisement rapide de leurs batteries).

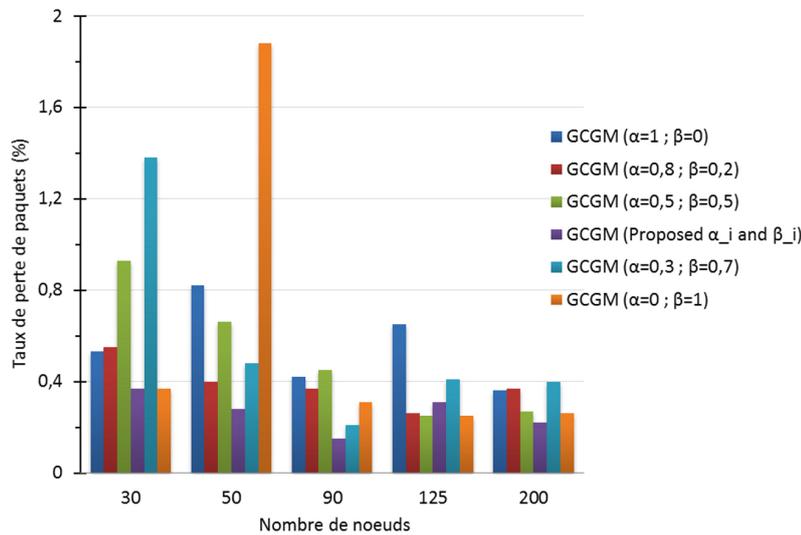


FIGURE 4.17 – Taux de perte de paquets

Énergie résiduelle moyenne

Cette mesure de performance est définie comme l'énergie résiduelle moyenne du réseau et reflète à son tour la durée de vie du réseau. La figure 4.18 présente l'énergie résiduelle moyenne qui reflète la consommation d'énergie nécessaire pour envoyer une image par notre proposition avec différentes valeurs de pondérations que ce soient statiques

ou variables. Elle montre que l'énergie restante moyenne du schéma de routage GCGM basé sur la distance est plus petite que dans les autres schémas de routage. Le protocole GCGM basé sur la distance maximise la progression du paquet vers la station de base en utilisant des sauts à grande distance entre le nœud transmetteur et le saut suivant et par conséquent, il consomme plus d'énergie que tous les autres schémas de routage. De plus, lorsqu'un paquet n'est pas reçu avec succès, il sera retransmis une autre fois ce qui entraîne des coûts supplémentaires en termes de consommation d'énergie. La figure 4.18 illustre que le protocole GCGM avec des poids proposés est meilleur que le protocole GCGM basé sur la distance en termes d'énergie restante car il utilise à la fois la distance et la direction avec des valeurs α_i optimales de chaque voisin. Notre proposition consomme plus d'énergie que le protocole GCGM basé sur la direction car il fournit plus de paquets de données et implique des chemins de routage écoénergétiques pour transmettre des paquets de données à la station de base et investit plus d'énergie pour choisir des chemins de routage fiables, ce qui permet d'éviter la retransmission des paquets et ainsi d'éliminer les coûts supplémentaires en termes d'énergie. GCGM avec une petite valeur de α_i consomme moins d'énergie que GCGM avec une grande valeur car il se comporte plus comme GCGM basé sur la direction.

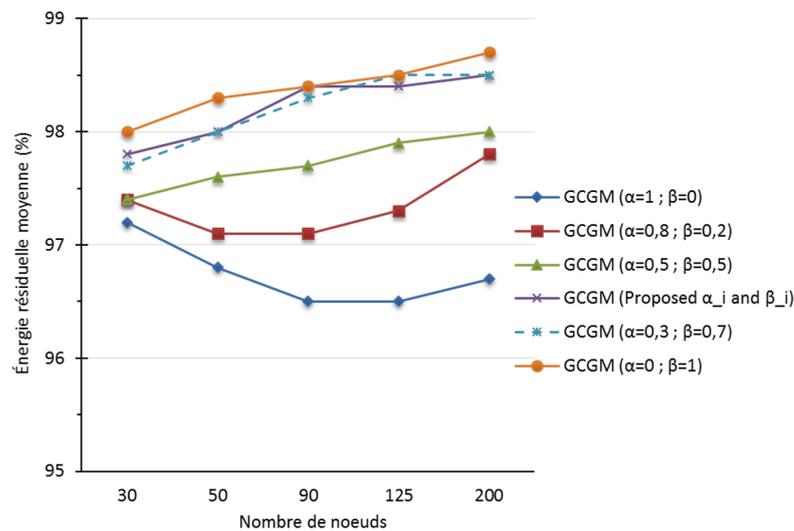


FIGURE 4.18 – Énergie résiduelle moyenne

Délai de bout en bout

Le délai de bout en bout représente le temps que met un paquet pour être acheminé d'une source vers une destination. Nous avons évalué le délai de bout en bout pour recevoir l'image complète au niveau de la station de base. La figure 4.19 illustre le délai de bout en bout pour tous les scénarios de schéma de routage GCGM. A partir de cette figure, nous pouvons constater que le délai moyen pour tous les schémas de routage diminue à mesure que le nombre de nœuds dans le réseau augmente, ce qui est tout à fait logique car il y a plus de nœuds qui sont dans l'état "libre". De plus, la figure 4.19 illustre que le schéma de routage GCGM basé sur la direction a les délais les plus élevés, par rapport à tous les autres schémas de routage, car il se concentre uniquement sur la direction et ignore la progression vers la station de base et construit ainsi des chemins avec un plus

grand nombre de sauts. Le schéma de routage GCGM basé sur la distance a le plus petit délai de bout en bout vu qu'il sélectionne des chemins de routage avec des sauts à des plus grandes distances. GCGM avec les valeurs α_i proposées a un délai de bout en bout plus grand que le schéma de routage GCGM basé sur la distance et un délai de bout en bout plus petit par rapport au schéma de routage GCGM basé sur la direction puisqu'il utilise la distance et la direction pour sélectionner le prochain saut ce qui signifie la construction de chemins avec un nombre de sauts supérieur à celui de GCGM basé sur la distance et inférieur à celui de GCGM basé sur la direction. La figure 4.19 montre également que le délai de bout en bout de notre solution proposée avec des pondérations proposées est plus proche du délai de bout en bout de GCGM basé sur la distance en raison des valeurs optimales des α_i calculées pour chaque voisin candidat, et en raison du taux de perte de paquets réduit, et par conséquent il évite la retransmission des paquets perdus. En outre, comme le montre la figure 4.19, nous observons également que le délai de bout en bout du protocole GCGM dépend des constantes pondérées α et β . Si la valeur de α est plus proche de 1, le délai de bout en bout de l'approche hybride de GCGM avec des poids fixes ressemble plus à celui du protocole GCGM basé sur la distance, et si la valeur de α est plus proche de 0 l'approche hybride GCGM avec des poids fixes est plus comme GCGM basé sur la direction.

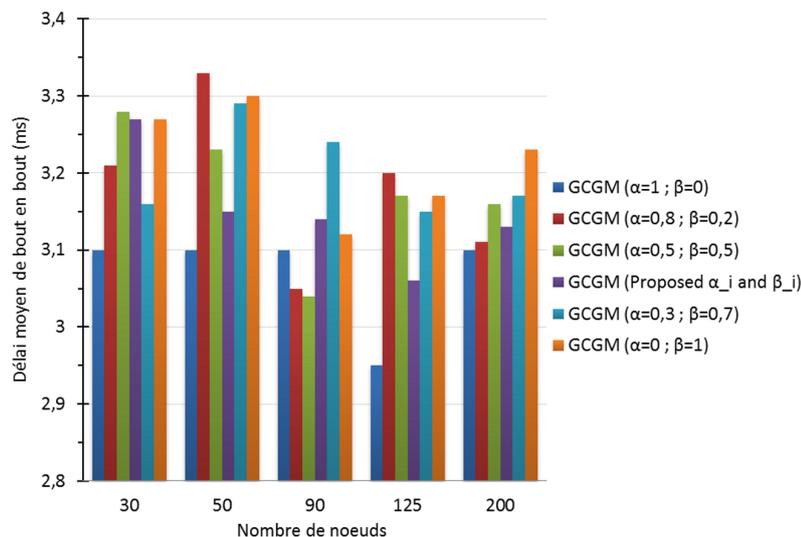


FIGURE 4.19 – Délai moyen de bout en bout

Durée de vie du réseau

Cette métrique représente la période pendant laquelle un réseau fonctionne jusqu'à ce que le premier nœud ou un groupe de nœuds dans le réseau épuise leur énergie. La figure 4.20 illustre la durée de vie du réseau pour tous les schémas de routage pour les différentes topologies. Elle montre que la durée de vie du réseau de tous les schémas de routage augmente avec le nombre de nœuds. Elle montre également que GCGM avec les poids proposés pour la distance et la direction a la meilleure durée de vie du réseau par rapport aux autres schémas de routage puisqu'il implique un grand nombre de nœuds dans le processus de routage grâce à l'attribution des valeurs différentes aux coefficients associés à la distance et à la direction pour chaque voisin. Cette politique de sélection

de nœuds relais permet une consommation d'énergie équilibrée entre les nœuds, et par conséquent une longue durée de vie du réseau.

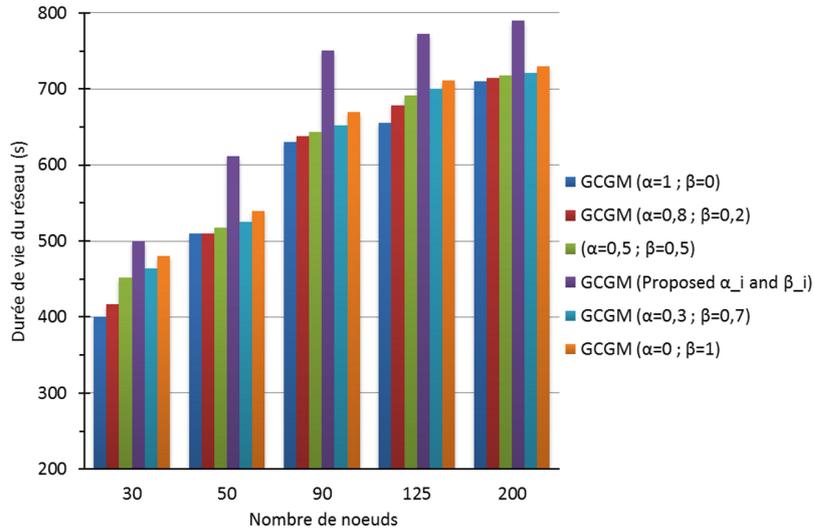


FIGURE 4.20 – Durée de vie du réseau

Rapport signal/bruit (PSNR)

Le PSNR est défini comme le rapport entre la puissance maximale possible d'un signal et la puissance du bruit correcteur, et il est exprimé par l'équation (4.14).

$$PSNR(dB) = 10 * \log_{10}\left(\frac{MAX_f}{\sqrt{MSE}}\right) \quad (4.14)$$

où MAX_f est la valeur maximale du signal qui existe dans l'image d'origine envoyée par le nœud source à la station de base et "Mean Squared Error (MSE)", qui est exprimée par l'équation (4.15).

$$MSE = \frac{1}{m * n} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} \|f(i, j) - g(i, j)\|^2 \quad (4.15)$$

où f représente les données matricielles de l'image originale au nœud source, g est les données matricielles de l'image reçue à la station de base, n est le nombre de lignes de pixels des images, i est l'indice de cette ligne, m est le nombre de colonnes de pixels de l'image et j représente l'indice de cette colonne.

Une valeur PSNR plus élevée est bonne car elle implique que le rapport signal sur bruit est plus élevé. La figure 4.21 illustre la comparaison de GCGM basé sur la distance, GCGM basé sur la direction et GCGM avec les valeurs α_i proposées et avec différentes valeurs fixes en termes de la valeur PSNR. Le protocole GCGM avec les valeurs α_i proposées a amélioré la valeur PSNR car le contenu transmis a réduit les propagations d'erreur. Cela montre clairement que GCGM avec des pondérations proposées a de meilleures performances que tous les autres protocoles en termes de PSNR.

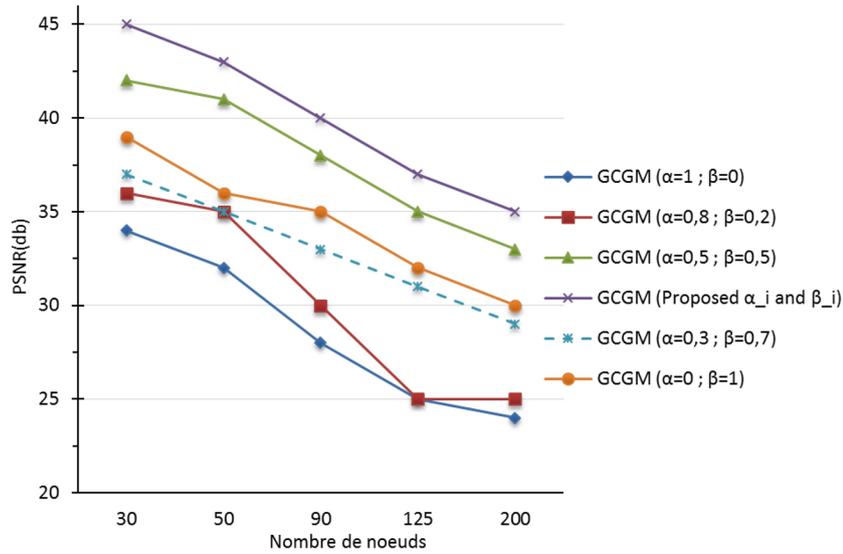


FIGURE 4.21 – PSNR vs nombre de nœuds

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé deux schémas de routage multi-chemin pour les RCMSFs. Le premier schéma de routage proposé est un protocole de routage géographique multi-chemin basé sur la qualité de lien et l'équilibrage de charge (LQLB-MGR). Ce schéma de routage comprend deux phases, une pour la construction de chemins multiples et l'autre pour équilibrer la charge entre ces chemins. Durant la première phase LQLB-MGR utilise la distance entre les nœuds voisins et le nœud puits, l'énergie restante de ces voisins ainsi que la valeur ETX pour l'établissement de l'ensemble de chemins. La métrique de qualité de lien ETX est utilisée pour sélectionner des chemins avec des liaisons de communication fiables. La deuxième phase sert à équilibrer la charge entre les chemins construits durant la première phase en fonction de l'énergie résiduelle nodale. Les résultats de simulation obtenus illustrent que LQLB-MGR fournit de meilleures performances par rapport à d'autres schémas de routage proposés dans la littérature en termes de taux de livraison de paquets (PDR), nombre de paquets perdus, délai de bout en bout et durée de vie du réseau. Le deuxième schéma de routage présenté est un protocole géographique multi-chemin (GCGM) qui fusionne les deux approches de routage glouton (distance-based et direction-based) et propose des valeurs de pondérations pour chacune de ces deux approches pour chaque nœud voisin. Les résultats de simulation ont montré que le protocole GCGM se comporte mieux que les protocoles basés uniquement sur la distance ou sur la direction ou hybride avec des valeurs de pondérations statiques en termes de taux de paquets délivrés, nombre de nœuds morts, durée de vie du réseau et PSNR.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les RCMSFs couvrent une gamme très diversifiée d'applications telles que les soins médicaux avancés, la gestion du trafic, la surveillance environnementale, l'assistance automatisée, les maisons intelligentes, le contrôle des processus industriels, etc. Ces derniers ont ainsi plus d'exigences et de défis supplémentaires que les RCSFs traditionnels, tels qu'une gigue acceptable, une bande passante élevée, un délai de bout en bout limité et un faible taux de perte de paquets. De plus, les RCMSFs ont de nombreuses contraintes de ressources en termes d'espace mémoire, d'énergie et de capacité de traitement, ce qui rend le routage dans ce type de réseaux une tâche difficile. Le routage multi-chemin peut exploiter efficacement les ressources limitées dans les RCMSFs en fournissant une bande passante suffisante pour les données multimédias et en améliorant la qualité de service. Par ailleurs, étant donné que le routage géographique ne nécessite ni la maintenance des tables de routage ni la construction de routes lors du processus de transmission de données, nous utilisons cette stratégie de routage pour la transmission des contenus multimédias, qui se caractérisent par leur grande taille.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés au routage multi-chemin dans les réseaux de capteurs multimédias sans fil. Nous avons proposé des schémas de routage géographique multi-chemin permettant d'améliorer les performances des RCMSFs tout en tenant compte des contraintes de ressources dans ce type de réseaux. Les travaux de recherche effectués dans le cadre de cette thèse sont résumés comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous avons introduit la notion des RCMSFs et présenté les différents aspects de ce type de réseaux. Ensuite, nous avons mis en évidence le modèle de communication, et la consommation d'énergie dans cette famille de réseaux. Dans la section qui suit, nous avons focalisé notre attention sur les principaux enjeux liés à la conception des RCMSFs. Enfin, nous avons abordé le routage dans les RCMSFs en détaillant les différents types de routage, l'approche de routage multi-chemin ainsi que le routage géographique.
- Dans le deuxième chapitre, un état de l'art détaillé est présenté sur les différents schémas de routage multi-chemin proposés dans la littérature pour les RCMSFs. Puis, nous avons présenté une étude comparative basée sur divers critères entre ces différents schémas de routage. Ensuite, nous avons détaillé un panorama de protocoles géographiques multi-chemins existants dans la littérature pour les RCMSFs, ainsi qu'une comparaison entre ces différents protocoles a été présentée dans l'objectif est de mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chacun d'eux.
- Dans le troisième chapitre, nous avons détaillé nos deux premières contributions relatives au routage géographique multi-chemin pour les RCMSFs. Chaque contri-

bution présente des améliorations par rapport à certains protocoles existants dans la littérature. La première contribution "MMGPSR" est une version multi-chemin du protocole GPSR pour supporter la transmission des flux multimédias. En fait, il est bien connu que le protocole GPSR souffre d'un partage de charge inéquitable entre l'ensemble des nœuds du réseau où certains nœuds sont surutilisés dans le routage et d'autres sont rarement impliqués. Dans cette optique, notre solution proposée permet de partager la charge de routage entre tous les nœuds du réseau à travers l'implication de plusieurs chemins pour transmettre les flux de données. Par conséquent, le taux de paquets perdus a été diminué et la durée de vie du réseau a été augmentée par rapport à ceux du protocole GPSR. La deuxième contribution est une extension du protocole AGEM, appelée "TLQM-AGEM", dans laquelle nous avons mis en évidence la qualité de lien de communication. Cette contribution permet la découverte de plusieurs chemins à nœuds-disjoints en fonction d'une métrique triangulaire de qualité de lien, de la distance à un saut et de l'énergie résiduelle des nœuds candidats.

- Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté deux nouvelles contributions destinées au routage multi-chemin basé sur la localisation. La troisième contribution appelée "LQLB-MGR" permet de sélectionner des chemins avec de très bons liens de communication et garantir l'équilibrage de charge entre ces chemins choisis. Ce protocole comporte deux phases. La première phase est responsable de la construction de l'ensemble de chemins à nœuds-disjoints entre le nœud source et la station de base avec une qualité de lien élevée et la deuxième phase est chargée de garantir un équilibrage de charge entre tous les chemins construits pendant la première phase en se basant sur l'énergie restante nodale. La quatrième contribution appelée "GCGM", est une approche de routage basée sur la transmission gloutonne. Dans cette contribution nous avons opté à une approche hybride de la transmission gloutonne. Cette approche est basée sur les deux stratégies de routage glouton : routage glouton basé distance et routage glouton basé direction. GCGM combine ces deux stratégies de telle sorte qu'il donne de l'importance de l'une à l'autre selon des coefficients de pondération associés à chaque stratégie et pour chaque nœud i.e. chaque nœud à ses propres coefficients de pondération pour chaque stratégie.

Les travaux effectués tout au long de cette thèse traitent les problèmes de routage multi-chemin dans les RCMSFs liés principalement à la contrainte des ressources des nœuds d'une part et à la grande masse de données multimédias d'autre part ce qui a envisagé plusieurs perspectives.

Puisque les solutions de routage multi-chemin proposées dans le cadre de cette thèse considèrent uniquement une seule paire de nœuds (nœud source et station de base), il est préférable d'élargir nos solutions avec plusieurs nœuds sources et plusieurs nœuds puits.

En plus, l'utilisation d'autres métriques pour la sélection des sauts suivants pendant la phase de découverte de chemins tels que d'autres manières pour évaluer avec plus de précision la qualité de lien, le délai, le nombre de voisins, etc. peuvent améliorer éventuellement les performances de nos travaux proposés.

En outre, plusieurs études de recherche ne prennent pas en compte l'aspect de mobilité des nœuds malgré l'efficacité de cet aspect qui permet le développement des applications

multimédias dans le domaine des RCMSFs. Par conséquent, il est important d'étendre nos solutions proposées dans des environnements où les nœuds sont mobiles.

De plus, la qualité de service peut être affectée par toutes les couches de la pile protocolaire, et à cet effet, afin de garantir un niveau élevé de QoS et d'améliorer les performances des RCMSFs, la meilleure solution est d'instaurer une approche qui permet l'interaction entre les différentes couches. Par exemple, une interaction entre les deux couches "réseau et application" pour un choix efficace de l'ensemble des chemins.

Enfin, les performances de nos solutions de routage ont été démontrées par le simulateur OMNeT++ et le framework Castalia, il vaut mieux expérimenter ces solutions dans un environnement réel pour comparer les performances réelles avec celles obtenues à travers des simulations.

Références Bibliographiques

Bibliographie

- [1] K. BARKA, *Une plateforme Middleware pour l'auto-adaptation des réseaux de capteurs sans fil hétérogènes*. PhD thesis, Université de Batna 2, Algérie, Juin 2019.
- [2] L. C. Campo, *Gestion de la qualité de service et planification optimale de réseaux de capteurs multimédia sans fil*. PhD thesis, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada, 2011.
- [3] O. A. Fdili, *Optimisation multicritères de la qualité de service dans les réseaux de capteurs multimédia sans fil*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, France ; Université Mohammed V-Agdal (Rabat, Maroc), Juin 2015.
- [4] T. M. I.F. Akyildiz and K. Chowdhury, "A Survey on Wireless Multimedia Sensor Networks," *Computer Networks Journal (Elsevier)*, vol. 51, pp. 921–960, March 2007.
- [5] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, vol. 2, p. 10, January 2000.
- [6] S. Jung, J. Lee, and B. Roh, "An Optimized Node-Disjoint Multi-path Routing Protocol for Multimedia Data Transmission over Wireless Sensor Networks," in *IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications*, pp. 958–963, 2008.
- [7] S. Medjiah, T. Ahmed, and F. Krief, "AGEM : Adaptive Greedy-Compass Energy-Aware Multipath Routing Protocol for WMSNs," in *Proceedings 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pp. 1–6, Jan 2010.
- [8] S. Medjiah, T. Ahmed, and A. H. Asgari, "Streaming multimedia over WMSNs : an online multipath routing protocol," *International Journal of Sensor Networks*, vol. 11, no. 1, pp. 10–21, 2012.
- [9] M. Abazeed, K. Saleem, A. Derhab, M. A. Orgun, N. Fisal, J. Al-Muhtadi, and S. Zubaair, "A Review of Secure Routing Approaches for Current and Next-Generation Wireless Multimedia Sensor Networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 10, p. Article :524038, 2015.
- [10] R. Chiwariro and N. Thangadurai, "Quality of service aware routing protocols in wireless multimedia sensor networks : survey," *International Journal of Information Technology*, pp. 1–12, 2020.

- [11] S. Li, J. G. Kim, D. H. Han, and K. S. Lee, “A Survey of Energy-Efficient Communication Protocols with QoS Guarantees in Wireless Multimedia Sensor Networks,” *Sensors*, vol. 19, no. 1, 2019.
- [12] Y. S. I.F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci, “Wireless sensor networks : a survey,” *Computer Networks (Elsevier)*, vol. 38, pp. 393–422, March 2002.
- [13] Y. Zatout, *Conception et évaluation de performances d’un réseau de capteurs sans fil hétérogène pour une application domotique*. PhD thesis, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, France, 2011.
- [14] M. S.-H. Yahya Esmail Osais and R. Y. Fei, “Directional sensor placement with optimal sensing range, field of view and orientation,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 15, no. 2, pp. 216–225, 2010.
- [15] M. N. Bouatit, *Optimisation du routage, tolérance aux pannes et gestion de l’énergie et de l’interférence pour la transmission des flux multimédia temps réel dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Centre d’études et de recherche en informatique et communications, Paris, France, 2018.
- [16] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, *Wireless Sensor Networks*, vol. 4. New York, NYUnited States : John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [17] P. Milica, T. Zhilbert, D. Goran, and M. Veljko, “A survey of military applications of wireless sensor networks,” in *The Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO’12)*, pp. 196–199, 2012.
- [18] C. Duran-Faundez, *Transmission d’images sur les réseaux de capteurs sans fil sous la contrainte de l’énergie*. PhD thesis, Université Henri Poincaré, France, France, Juin 2009.
- [19] A. Chefi, *Conception d’un micro-capteur d’image CMOS à faible consommation d’énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Grenoble, France, Janvier 2014.
- [20] J. Campbell, P. B. Gibbons, S. Nath, P. Pillai, S. Seshan, and R. Sukthankar, “IrisNet : An internet-scale architecture for multimedia sensors,” in *Proceedings of the 13th Annual ACM international conference on Multimedia (MULTIMEDIA ’05)*, pp. 81–88, ACM, November 2005.
- [21] L. Makkaoui, *Compression d’images dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Lorraine, France, Novembre 2012.
- [22] I. F. Akyildiz, Weilian Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A survey on sensor networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, pp. 102–114, August 2002.
- [23] A. Chouha, *Traitement et Transfert d’images Par Réseau de Capteurs sans Fil*. PhD thesis, Université Hadj Lakhder, Batna, Algérie, Batna, Algérie, 2011. Mémoire de magister.

-
- [24] I. Bouazzi, *Optimisation d'accès au medium afin d'économiser de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Monastir, Tunisie, Tunis, Avril 2018.
- [25] M. Hamze, *Autonomie, sécurité et QoS de bout en bout dans un environnement de Cloud Computing*. PhD thesis, Université de Bourgogne, France, Décembre 2015.
- [26] S. Aswale and V. R. Ghorpade, "Survey of qos routing protocols in wireless multimedia sensor networks," *Journal of computer Networks and communications*, pp. 1–29, 2015.
- [27] B. R. Smith and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Best Effort Quality-of-Service," in *Proceedings of 17th International Conference on Computer Communications and Networks*, pp. 1–6, 2008.
- [28] I. Bennis, *Contribution aux protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil : Application à la supervision agricole*. PhD thesis, Thèse en cotutelle, Université Mohammed V-Agdal (Maroc) et Université de Reims Champagne-Ardenne (France), Octobre 2015.
- [29] H.-X. Tan, "Quality of service in wireless sensor networks," Master's thesis, department of computer science, national university of Singapore, Singapore, 2006.
- [30] P. Johansson, M. Kazantzidis, R. Kapoor, and M. Gerla, "Bluetooth : an enabler for personal area networking," *IEEE Network*, vol. 15, no. 5, pp. 28–37, 2001.
- [31] Y. Zhang and H. Xiao, "Bluetooth-Based Sensor Networks for Remotely Monitoring the Physiological Signals of a Patient," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 13, no. 6, pp. 1040–1048, 2009.
- [32] A. Ben, B. Tony, S. Katja, Z. Ernesto, M. Wasim, E. David, O. Laurent, and O. Ian, "Ultra Wideband : Applications, Technology and Future perspectives," in *International Workshop on Convergent Technologies (IWCT)*, (Oulu,Finland), 2005.
- [33] D. Han and J. Lim, "Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and zigbee," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 1403–1410, 2010.
- [34] Z. Bédai, *Routage multi-chemin avec qualité de service pour le transport d'un trafic scalaire/multimédia dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université d'Oran 1, Algérie, Algérie, 2013.
- [35] P. Baronti, P. Pillai, V. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu, "Wireless Sensor Networks : a Survey on the State of the Art and the 802.15.4 and ZigBee Standards," *Computer Communication*, vol. 30, no. 7, pp. 1655–1695, 2007.
- [36] T. Melodia and I. F. Akyildiz, "Research Challenges for Wireless Multimedia Sensor Networks," *Distributed Video Sensor Networks*, Springer, pp. 233–246, 2011.

- [37] E. hadji Serigne Mamour Diop, *Optimisation de la transmission d'images dans les réseaux de capteurs*. PhD thesis, Université de Pau et des pays de l'Adour, France, Université Gaston Berger de Saint-Luis, Sénégal, Juin 2014.
- [38] N. Bendimerad, *Système de surveillance d'infrastructures publiques à l'aide des réseaux de capteurs vidéo sans fil*. PhD thesis, Université Ahmed ben Bela, Oran, Algérie, 2015.
- [39] K. Beydoun, *Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs*. PhD thesis, université de Franche-Comté, France, France, 2009.
- [40] E. Kaplan and C. Hegarty, *Understanding GPS : principles and applications*. Artech house, 2005.
- [41] J. Champ and V. Boudet, "Adnl-angle : accurate distributed node localization for wireless sensor networks with angle of arrival information," in *In : Nikolaidis I., Wu K. (eds) Ad-Hoc, Mobile and Wireless Networks. ADHOC-NOW 2010.*, pp. 177–190, 2010.
- [42] G. Han, H. Xu, T. Q. Duong, J. Jiang, and T. Hara, "Localization algorithms of wireless sensor networks : a survey," *Telecommunication Systems*, vol. 52, pp. 2419–2436, 2013.
- [43] S. Santhi and G. S. Sadasivam, "Enhanced AOMDV for energy conservation in hybrid ad hoc networks," *International Journal of Information and Communication Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 122–141, 2014.
- [44] A. A. Aouiz, *Qualité de service dans les protocoles multi-chemins*. PhD thesis, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès- Algérie En cotutelle internationale avec l'université de Haute Alsace -France, Juin 2020.
- [45] A. Chikh and M. Lehsaini, "Multipath routing protocols for wireless multimedia sensor networks : a survey," *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 60–81, 2018.
- [46] A. A. Aouiz, S. Boukli Hacene, P. Lorenz, and M. Gilg, "Network Life Time maximization of the AOMDV Protocol Using Nodes Energy Variation," *Network Protocols and Algorithms*, vol. 10, no. 2, pp. 73–94, 2018.
- [47] R. E. Ahmed, "A fault-tolerant, energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks," in *International Conference on Information and Communication Technology Research (ICTRC)*, pp. 175–178, 2015.
- [48] M. Radi, B. Dezfouli, K. A. Bakar, and M. Lee, "Multipath Routing in Wireless Sensor Networks : Survey and Research Challenges," *Sensors*, vol. 12, no. 1, pp. 650–685, 2012.
- [49] L. Sitanayah, K. N. Brown, and C. J. Sreenan, "Fault-tolerant relay deployment for k node-disjoint paths in wireless sensor networks," in *International Conference IFIP Wireless Days (WD)*, pp. 1–6, 2011.

-
- [50] O. B. Akan, "Performance of Transport Protocols for Multimedia Communications in Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 10, pp. 826–828, 2007.
- [51] K. Sha, J. Gehlot, and R. Greve, "Multipath routing techniques in wireless sensor networks : a survey," *Wireless Personal Communications*, vol. 70, no. 2, pp. 807–829, 2013.
- [52] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR : Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks," in *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '00, (New York, NY, USA), pp. 243–254, ACM, 2000.
- [53] H. Takagi and L. Kleinrock, "Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 32, no. 3, pp. 246–257, 1984.
- [54] E. Kranakis, H. Singh, and J. Urrutia, "Compass Routing on Geometric Networks," in *Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry*, pp. 51–54, 1999.
- [55] P. Bose and P. Morin, "Online Routing in Triangulations," in *International Symposium on Algorithms and Computation*, pp. 113–122, Springer, Berlin, Heidelberg, 1999.
- [56] P. R. Morin, *On line routing in geometric graphs*. PhD thesis, University, Ottawa, Canada, January 2001.
- [57] R. K. Anandan and S. Amirthalingam, "Cluster-based Multipath Routing for Wireless Multimedia Sensor Networks," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems.*, vol. 9, no. 4, pp. 79–87, 2016.
- [58] H. D. E. Al-Ariki and M. N. S. Swamy, "A survey and analysis of multipath routing protocols in wireless multimedia sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 23, no. 6, pp. 1823–1835, 2016.
- [59] M. Z. Hasan, H. Al-Rizzo, and F. Al-Turjman, "A Survey on Multipath Routing Protocols for QoS Assurances in Real-Time Wireless Multimedia Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1424–1456, 2017.
- [60] B. Fu, R. Li, X. Xiao, C. Liu, and Q. Yang, "Non-interfering Multipath Geographic Routing for Wireless Multimedia Sensor Networks," in *Proceedings of International Conference on Multimedia Information Networking and Security*, vol. 18, pp. 254–258, Nov 2009.
- [61] I. Bennis, H. Fouchal, O. Zytoune, and D. Aboutajdine, "Carrier Sense Aware Multipath Geographic Routing Protocol," *Wireless Communication and Mobile Computing*, vol. 16, no. 9, pp. 1109–1123, 2016.

- [62] S. . Lee and M. Gerla, “Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC’2001)*, vol. 10, pp. 3201–3205, 2001.
- [63] Z. yuan LI and R. chuan WANG, “Load balancing-based hierarchical routing algorithm for wireless multimedia sensor networks,” *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, vol. 17, no. 2, pp. 51–59, 2010.
- [64] M. Xie and Y. Gu, “MultiPath Routing Algorithm for Wireless Multimedia Sensor Networks within Expected Network Lifetime,” in *International Conference on Communications and Mobile Computing*, vol. 3, pp. 284–287, April 2010.
- [65] B. Y. Li and P. J. Chuang, “Geographic energy-aware non-interfering multipath routing for multimedia transmission in wireless sensor networks,” *Information Sciences*, vol. 249, pp. 24–37, 2013.
- [66] M. Chen, V. C. Leung, S. Mao, and Y. Yuan, “Directional geographical routing for real-time video communications in wireless sensor networks,” *Computer Communications*, vol. 30, no. 17, pp. 3368–3383, 2007.
- [67] M. Maimour, “Maximally radio-disjoint multipath routing for wireless multimedia sensor networks,” in *Proceedings of the 4th ACM Workshop on Wireless Multimedia Networking and Performance Modeling (WMuNeP’08)*, pp. 26–31, 2008.
- [68] H. Xu, L. Huang, C. Qiao, Y. Zhang, and Q. Sun, “Bandwidth-Power Aware Cooperative Multipath Routing for Wireless Multimedia Sensor Networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 4, pp. 1532–1543, 2012.
- [69] J. W. Suurballe and R. E. Tarjan, “A quick method for finding shortest pairs of disjoint paths,” *Networks (Wiley)*, vol. 14, no. 2, pp. 325–336, 1984.
- [70] K. Shin, J. Song, J. Kim, M. Yu, and P. S. Mah, “REAR : Reliable Energy Aware Routing Protocol for Wireless Sensor Networks,” in *Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Communication Technology*, vol. 1, pp. 525–530, 2007.
- [71] A. V. Sutagundar, S. S. Manvi, and K. B. Balavalad, “Energy efficient multipath routing protocol for WMSNs,” *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 503–510, 2010.
- [72] D. Kandris, M. Tsagkaropoulos, I. Politis, A. Tzes, and S. Kotsopoulos, “Energy efficient and perceived QoS aware video routing over Wireless Multimedia Sensor Networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 4, pp. 591–607, 2011. Multimedia Ad Hoc and Sensor Networks.
- [73] A. Nayyar, F. Bashir, and Ubaid-UR-Rehman, “Load based energy aware multimedia routing protocol-(LEAR),” in *Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Research and Development*, vol. 2, pp. 427–430, 2011.

- [74] N. S. M. Usop, A. Abdullah, and A. F. A. Abidin, "Performance evaluation of AODV, DSDV & DSR routing protocol in grid environment," *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 9, no. 7, pp. 261–267, 2009.
- [75] I. Bennis, O. Zytoune, D. Aboutajdine, and H. Fouchalz, "Low Energy Geographical Routing Protocol for Wireless Multimedia Sensor Networks," in *Proceedings of 9th International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, pp. 585–589, July 2013.
- [76] L. Shu, Y. Zhang, L. T. Yang, Y. Wang, M. Hauswirth, and N. Xiong, "TPGF : geographic routing in wireless multimedia sensor networks," *Telecommunication Systems*, vol. 44, pp. 79–95, Jun 2010.
- [77] S. Y. Bae, S. K. Lee, and J. G. Koh, "Multipath Routing Method for Supporting QoS and Improving Energy Efficiency in WMSNs," *Ubiquitous Information Technologies and Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer*, vol. 280, pp. 843–850, 2014.
- [78] Shuang Li, R. Neelisetti, Cong Liu, and A. Lim, "Delay-constrained high throughput protocol for multi-path transmission over wireless multimedia sensor networks," in *International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, pp. 1–8, 2008.
- [79] J. Agrakhed, G. S. Biradar, and V. D. Mytri, "Adaptive Multi Constraint Multipath Routing Protocol in Wireless Multimedia Sensor Network," in *International Conference on Computing Sciences (ICCS'12)*, pp. 326–331, 2012.
- [80] Guannan Sun, Jiandong Qi, Zhe Zang, and Qihong Xu, "A reliable multipath routing algorithm with related congestion control scheme in wireless multimedia sensor networks," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Research and Development*, vol. 4, pp. 229–233, 2011.
- [81] H. Shen, G. Bai, Z. Tang, and L. Zhao, "QMOR : QoS-aware multi-sink opportunistic routing for wireless multimedia sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 75, no. 2, pp. 1307–1330, 2014.
- [82] L. Zhang, M. Hauswirth, L. Shu, Z. Zhou, V. Reynolds, and G. Han, "Multi-priority Multi-path Selection for Video Streaming in Wireless Multimedia Sensor Networks," in *International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing* (F. E. Sandnes, Y. Zhang, C. Rong, L. T. Yang, and J. Ma, eds.), (Berlin, Heidelberg), pp. 439–452, Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [83] J. Ashish, R. Santhosha, and S. Kumara, "Application Aware Energy Efficient Geographic Greedy Forwarding in Wireless Multimedia Sensor Networks," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 1, no. 5, pp. 222–227, 2012.
- [84] S. Aswale and V. R. Ghorpade, "LQEAR : Link Quality and Energy-Aware Routing for Wireless Multimedia Sensor Networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 97, no. 1, pp. 1291–1304, 2017.

- [85] S. Aswale and V. R. Ghorpade, "Geographic Multipath Routing based on Triangle Link Quality Metric with Minimum Inter-path Interference for Wireless Multimedia Sensor Networks," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 2018.
- [86] S. Aswale and V. R. Ghorpade, "EEMGR : Energy and ETX aware Multipath Geographic Routing in WMSN," in *Proceedings of the 3rd International Conference On Internet of Things : Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, 2018.
- [87] M. Chen, V. C. Leung, L. Shu, and H. C. Chao, "On Multipath Balancing and Expanding for Wireless Multimedia Sensor Networks," *Int. J. Ad Hoc Ubiquitous Comput.*, vol. 9, pp. 95–103, Feb. 2012.
- [88] J. Wang, Y. Zhang, J. Wang, Y. Ma, and M. Chen, "PWDGR : Pair-Wise Directional Geographical Routing Based on Wireless Sensor Network," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 2, pp. 14–22, Feb 2015.
- [89] H. D. E. Al-ariki , A. S. Mohammed, and M. N. S. Swamy, "Energy-Efficient Geographical Multi-path Routing Protocol with Adaptive Load Balancing for Wireless Multimedia Sensor Networks," *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, vol. 9, no. 9, pp. 148–166, 2017.
- [90] H. D. E. Al-ariki , M. A. Alareqi, and M. N. S. Swamy, "An Enhanced Artificial Bee Colony Based EELB-PWDGR for Optimized Route Selection in Wireless Multimedia Sensor Networks," *Pertanika Journal of Science & Technology*, vol. 26, no. 4, pp. 1951–1974, 2018.
- [91] S. Medjiah, T. Ahmed, and F. Krief, "GEAMS : A Geographic Energy-Aware Multipath Stream-based routing protocol for WMSNs," in *Proceedings of International Symposium Global Information Infrastructure (GIIS'09)*, pp. 1–8, June 2009.
- [92] Z. Serhan and W. B. Diab, "Energy-Efficient QoS Routing in Wireless Multimedia Sensor Networks," in *Proceedings of 29th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, vol. 24, (Gwangju, South Korea), pp. 223–230, March 2015.
- [93] F. Al-Quran, M. Mowafi, A. Almaaitah, and E. Taqieddin, "Energy-Efficient and QoS-Aware Multi-path Geographic Routing Protocol for WMSN," in *International Conference IEEE Globecom workshops (GC Wkshps)*, pp. 1–6, 2018.
- [94] A. Chikh and M. Lehsaini, "AGEM-based Multipath Routing Protocol using Triangle Link Quality for Wireless Multimedia Sensor networks," in *Proceedings of the 3rd International Conference NISS2020*, no. 36, (Marrakech, Morocco), March 31-April 2 2020.
- [95] D. B. Johnson and D. A. Maltz, *Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks*, pp. 153–181. Boston, MA : Springer US, 1996.
- [96] K. Lin, J. J. P. C. Rodrigues, H. Ge, N. Xiong, and X. Liang, "Energy Efficiency QoS Assurance Routing in Wireless Multimedia Sensor Networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 495–505, 2011.

-
- [97] B. Namazi and K. Faez, "Power-aware QoS routing for wireless multimedia sensor networks," in *Proceedings of the 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1–5, 2013.
- [98] S. Lee, J. G. Koh, and C. R. Jung, "An Energy-Efficient QoS-aware Routing Algorithm for Wireless Multimedia Sensor Networks," *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 245–252, 2014.
- [99] L. Cheng, J. Niu, J. Cao, S. K. Das, and Y. Gu, "QoS Aware Geographic Opportunistic Routing in Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, no. 7, pp. 1864–1875, 2014.
- [100] A. Chikh and M. Lehsaini, "A Multipath Node-Disjoint Greedy Forwarding Routing Scheme for Wireless Multimedia Sensor Networks," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Multimedia Information Processing*, (Mascara, Algeria), 9-10 October 2018.
- [101] A. Varga and R. Hornig, "An Overview of the OMNeT++ Simulation Environment," in *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*, Simutools '08, (ICST, Brussels, Belgium, Belgium), pp. 1–10, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008.
- [102] C. A. Boano, M. A. Zúñiga, T. Voigt, A. Willig, and K. Römer, "The Triangle Metric : Fast Link Quality Estimation for Mobile Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of 19th International Conference on Computer Communications and Networks*, pp. 1–7, 2010.
- [103] A. Chikh and M. Lehsaini, "Link Quality and Load Balancing Multipath Geographic Routing for Wireless Multimedia Sensor Networks," *International Journal of Wireless Networks and Broadband Technologies (IJWNBT)*, vol. 10, pp. 45–58, January 2021.
- [104] E. Y. Sun, X. J. Shen, and H. P. Chen, "Energy Balancing Multipath Routing Protocol in Wireless Multimedia Sensor Networks," in *Mechanical Engineering and Green Manufacturing II*, vol. 155, pp. 245–249, 3 2012.
- [105] M. N. Bouatit, S. Boumerdassi, and A. Djama, "A Geographic Multipath Routing Protocol for Wireless Multimedia Sensor Networks," in *Mobile, Secure, and Programmable Networking* (S. Boumerdassi, É. Renault, and S. Bouzefrane, eds.), (Cham), pp. 99–108, Springer International Publishing, 2016.
- [106] U. S. Padwalkar and D. D. Ambawade, "Multipath based energy efficient (mee) routing protocol for wmsns," in *IJCA Proceedings on International Conference on Communication Technology*, pp. 19–24, 2013.
- [107] U. S. Padwalkar and D. D. Ambawade, "MMRE-AOMDV based energy efficient (MAEE) Routing Protocol for WMSNs," in *International Conference on Communication, Information Computing Technology (ICCICT)*, pp. 1–7, 2015.

BIBLIOGRAPHIE

- [108] S. I. A. Shah, M. Ilyas, and H. T. Mouftah, *Pervasive Communications Handbook*. USA : CRC Press, Inc., 1st ed., 2011.

Résumé

Le routage géographique multi-chemin est une stratégie efficace pour transmettre les flux de données dans les réseaux de capteurs multimédias sans fil (RCMSFs) puisqu'il permet de répondre aux exigences en termes de qualité de service (QoS) dans ce type de réseaux.

La première partie de cette thèse propose deux états de l'art sur les solutions de routage multi-chemin proposées dans la littérature pour les RCMSFs. Dans un premier temps, on a proposé une nouvelle classification de ces protocoles en se basant sur l'objectif du routage. Deuxièmement, on a classé les solutions de routage géographique multi-chemin selon les solutions originales et leurs dérivées. La deuxième partie de cette thèse consiste à améliorer, développer et concevoir de nouvelles solutions de routage géographique multi-chemin dans les RCMSFs. Le premier protocole proposé est une version multi-chemin du protocole GPSR appelé MMGPSR. Ensuite, nous avons conçu une extension du protocole AGEM où une métrique triangulaire de qualité de lien est ajoutée pour sélectionner le prochain saut, appelé TLQM-AGEM. Troisièmement, un nouveau protocole de routage géographique multi-chemin a été proposé, appelé LQLB-MGR. Cette solution de routage consiste en deux phases. La première est destinée à la construction de l'ensemble des chemins tandis que la deuxième sert à équilibrer la charge entre les chemins sélectionnés pendant la première phase. Enfin, un autre nouveau protocole géographique multi-chemin (GCGM) a été proposé. Ce protocole est basé sur une approche gloutonne.

Les résultats des simulations ont illustré les atouts de nos solutions de routage proposées en termes de plusieurs critères de performance tels que, la durée de vie du réseau, le taux de livraison des paquets (PDR) et la consommation d'énergie.

Mots-clés: RCMSFs, Routage multi-chemin, Routage géographique, Routage glouton, Exigences de QoS, Disjonction de chemins.

Abstract

Multipath geographic routing is an effective strategy for transmitting data flows in wireless multimedia sensor networks (WMSNs) since it enables to meet the Quality of Service (QoS) requirements in this type of networks.

The first part of this thesis proposes two states of the art concerning multipath routing solutions developed in the literature for WMSNs. First, a new classification of these protocols was proposed based on the purpose of routing. Second, the multipath geographic routing solutions have been classified according to the original solutions and their derivatives. The second part of this thesis consists to improve, develop and design new multipath geographic routing solutions in WMSNs. The first protocol proposed is a multi-path version of the GPSR protocol called MMGPSR. Next, we designed an AGEM protocol extension where a triangular link quality metric is added to select the next hop called TLQM-AGEM. Third, a new multipath geographic routing protocol is proposed, called LQLB-MGR, this routing solution consists of two phases where the first is intended for building the set of paths while the second is for load balancing between the paths selected during the first phase. Finally, another new multi-path geographic protocol is proposed based on the two greedy routing approaches called GCGM, this protocol also proposed weighted constants for all metrics used for the selection of paths.

The simulation results illustrated the benefits of our routing solutions in terms of several performance criteria such as the network lifetime, the packet delivery rate (PDR) and the power consumption.

Keywords: WMSNs, Multipath routing, Geographic routing, Greedy routing, QoS requirements, Path disjunction.

ملخص

يعد التوجيه الجغرافي متعدد المسارات إستراتيجية فعالة لإرسال تدفقات البيانات في شبكات استشعار الوسائط المتعددة اللاسلكية حيث يمكن أن يوفر متطلبات جودة الخدمة.

يقترح الجزء الأول من هذه الأطروحة حالتين من الفن فيما يتعلق بحلول التوجيه متعدد المسارات التي تم تطويرها في الأدبيات المخصصة لـ RCMSFs. أولاً، تم اقتراح تصنيف جديد لهذه البروتوكولات بناءً على الغرض من التوجيه. ثانياً، تم تصنيف حلول التوجيه الجغرافي متعدد المسارات وفقاً للحلول الأصلية ومشتقاتها. يتكون الجزء الثاني من هذه الرسالة من تحسين، تطوير وتصميم حلول توجيه جغرافي متعددة المسارات في RCMSFs. البروتوكول الأول المقترح هو إصدار متعدد المسارات من بروتوكول GPSR يسمى MMGPSR. بعد ذلك، قمنا بتصميم ملحق بروتوكول AGEM حيث تمت إضافة مقياس جودة الارتباط الثلاثي لتحديد القفزة التالية، المسمى TLQM- AGEM. ثالثاً، تم اقتراح بروتوكول توجيه جغرافي جديد متعدد المسارات، يسمى LQLB-MGR، يتكون حل التوجيه هذا من مرحلتين حيث تهدف الأولى إلى بناء مجموعة من المسارات بينما تقوم الثانية بموازنة الحمل بين المسارات المحددة في المرحلة الأولى. أخيراً، تم اقتراح بروتوكول جغرافي جديد متعدد المسارات بناءً على نهج التوجيه الجشع يسمى GCGM، كما اقترح هذا البروتوكول أيضاً ثوابت مرجحة لجميع المقاييس المستخدمة لاختيار المسارات.

أوضحت نتائج المحاكاة فوائد حلول التوجيه الخاصة بنا من حيث العديد من معايير الأداء مثل عمر الشبكة ومعدل تسليم الحزم (PDR) واستهلاك الطاقة.

الكلمات المفتاحية: شبكات استشعار الوسائط المتعددة اللاسلكية، التوجيه متعدد المسارات، التوجيه الجغرافي، التوجيه الجشع، متطلبات جودة الخدمة، فصل المسار.