



HAL
open science

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 capteur sans fil

Mohamed Nacer Bouatit

► **To cite this version:**

Mohamed Nacer 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 capteur sans fil. Réseaux sociaux et d'information [cs.SI]. Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, 2018. Français. NNT : 2018CNAM1188 . tel-01933271

HAL Id: tel-01933271

<https://theses.hal.science/tel-01933271v1>

Submitted on 23 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



École doctorale Informatique, Télécommunications et Électronique (Paris)

Centre d'Études et de Recherche en Informatique et Communications

THÈSE DE DOCTORAT

présentée par : **Mohamed Nacer BOUATIT**

soutenue le : **28 Juin 2018**

pour obtenir le grade de : **Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers**

Spécialité : **Informatique**

**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 capteur sans fil**

THÈSE dirigée par

Mme. BOUMERDASSI Selma

Maître de Conférences (HDR), CNAM-Paris

RAPPORTEURS

Mr. SENOUCI Sidi Mohammed

Professeur des Universités, Université de Bourgogne

Mr. ACHIR Nadjib

Maître de Conférences (HDR), Université Paris-13

EXAMINATEURS

Mr. MUHLETHALER Paul
(Président du jury)

Directeur de Recherche, INRIA-Paris

Mr. MILOCCO Ruben Horacio

Professeur des Universités, Université de Comahue

Mme. SAILHAN Françoise

Maître de Conférences (HDR), CNAM-Paris

Mr. RENAULT Eric (Invité)

Maître de Conférences (HDR), Télécom Sud-Paris

Remerciements

"Celui qui ne remercie pas les gens, ne remercie pas Allah".

Le Messager d'Allah (paix soit sur lui).

C'est avec un grand plaisir que je réserve ces lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à ma directrice de thèse, Madame Selma BOUMERDASSI, pour ses conseils, encouragements et disponibilités tout au long de ce travail. Son dévouement et sa totale confiance accordée, ont rendu le déroulement de cette thèse agréable.

Mes remerciements les plus sincères vont à Mr. Sidi Mohammed SENOUCI, Professeur à l'Université de Bourgogne et Mr. Nadjib ACHIR, Maître de conférences à l'Université Paris-13, de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être rapporteurs de cette thèse et consacré une partie de leur temps à la lecture de mon manuscrit.

Je tiens à remercier également Mr. Paul MUHLETHALER, Directeur de recherche à l'INRIA-Paris, Mr. Eric RENAULT, Maître de conférences à Télécom Sud-Paris et Mme. Françoise SAILHAN, Maître de conférences au CNAM-Paris, qui m'ont fait l'honneur d'avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury.

Je suis reconnaissant envers Mr. Ruben MILOCCO, Professeur à l'Université Nationale de Comahue-Argentine pour ses précieux conseils, disponibilités et sa pédagogie et également envers mon ami et frère Adel DJAMA, Ingénieur d'état à l'EMP-Alger, qui a été toujours disponible, à l'écoute et d'une grande aide.

J'adresse mes sincères remerciements à mes parents, ma femme, mes enfants chéris et ma belle famille, de m'avoir soutenu, encouragé et donné de la force pendant toutes ces années.

Résumé

Les applications multimédias dans les réseaux de capteurs sans fil, véhiculent des données volumineuses, qui nécessitent un taux de transmission élevé et un traitement intensif et par conséquent une consommation d'énergie importante. Transmettre efficacement avec les ressources limitées, ces flux hétérogènes, tout en assurant leur fiabilité et garantir les exigences de QoS, face aux différents types de défaillances qui peuvent surgir en temps réel, notamment dans les contextes critiques et les réseaux défectueux, demeure un verrou scientifique ouvert. C'est pourquoi, dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés aux aspects liés : au routage, à l'équilibrage de charge, à la tolérance aux pannes et à la gestion des interférences et nous avons développé un protocole de routage, baptisé GNMFT (*Geographic Non-interfering Multipath Fault Tolerant*).

En premier lieu, nous avons amélioré le mode de sélection des nœuds, pour faire face au problème du *Minimum-Local* où une fonction objective multicritères (distance, énergie et puissance de réception) relative au choix du prochain saut a été définie. Puis, nous avons introduit une phase d'optimisation des chemins construits et une approche adaptative gérant les transmissions simultanées. Ensuite, nous nous sommes orientés vers la tolérance aux pannes, pour assurer la fiabilité des données transmises ainsi que la connectivité du réseau. Pour ce faire, nous avons modélisé le nombre des paquets perdus durant la livraison et proposé deux mécanismes : un curatif pour réparer les défaillances soudaines et un préventif afin d'anticiper l'épuisement des batteries. Les deux mécanismes sont combinés avec une stratégie de basculement dynamique. Par la suite, nous avons présenté un modèle d'interférence et un troisième mécanisme qui limite les interactions entre les routes adjacentes. Enfin, nous avons défini un modèle de perte de chemins dans un environnement multi-paires (source,sink) où nous avons calculé le coefficient de probabilité d'erreur basé sur la distance qui sépare les flux. A l'issue, une nouvelle métrique a été ajoutée dans la fonction objective, relative à la somme des bruits des capteurs actifs qui interfèrent sur le nœud courant.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité des approches proposées qui ont été étudiées et validées à la fois par simulation et sur un banc d'essai expérimental.

Mots clés : Réseau de Capteur Multimédia Sans Fil, Routage géographique, Transmission multi-chemins, Tolérance aux pannes, Equilibrage de charge, Interférences.

Abstract

Multimedia applications in wireless sensor networks, convey large data, which require high transmission rate and intensive treatment and therefore high energy consumption. Effectively transmit these heterogeneous flows, with limited resources, while ensuring their reliability and guaranteeing QoS requirements, to deal with the different failures types that can occur in real time, especially in critical contexts and faulty networks, remains an open scientific problem. That's why, in this thesis, we interested on aspects related to : routing, load balancing, fault tolerance and interference management and developed a Geographic Non-interfering Multipath Fault Tolerant routing protocol called GNMFT.

First, we improved node's selection mode, to deal with Local Minimum problem, where a multi-criteria objective function (distance, energy and reception power) related to next-hop choice was defined. Then, we introduced an optimization phase and an adaptive approach to manage simultaneous traffic transmissions. Subsequently, we oriented towards fault tolerance, to ensure transmitted data reliability and network connectivity. To this end, we modeled the number of lost packets during package delivery and proposed two mechanisms. The curative is used when sudden failures occurs and the preventive to anticipate batteries depletion. Both are combined with a dynamic failover strategy. Finally, we presented an interference model and a third mechanism that limits interactions between adjacent links. In addition, we defined a path loss model in a multipairs environment (source, sink) where we computed error probability coefficient based on the distance, that separates streams. At the end, a new metric has been added in the objective function, related to noise sum of the active sensors that interferes on the current node.

Obtained results show the effectiveness of the proposed approaches that have been studied and validated both by simulation and on an experimental testbed.

Keywords : Wireless Multimedia Sensors Networks, Geographic routing, Multipath transmission, Fault-tolerance, Load balancing, Interferences.

Table des matières

Liste des figures	vii
Liste des tableaux	x
Introduction générale	1
1 Réseau de Capteur Multimédia Sans Fil	7
1.1 Introduction	8
1.2 Capteur multimédia	9
1.3 Réseau de Capteur Multimédia Sans Fil	11
1.4 La Qualité de Service dans les RCMSF	16
1.5 Modèle de communication des RCMSF	17
1.6 Facteurs influençant la conception des RCMSF	21
1.7 Conclusion	23
I Le routage dans les Réseaux de Capteurs Multimédia Sans Fil (RCMSF)	24
2 Etat de l'art des protocoles de routage	25
2.1 Introduction	26
2.2 Classification des protocoles de routage dans les RCMSF	26
2.3 Une bonne solution de routage	36
2.4 Routage géographique	36
2.5 Transmission multi-chemins	38
2.6 Conclusion	41
3 Protocole de routage Géographique Multi-Chemins (GM)	42
3.1 Introduction	43
3.2 Conception	43
3.3 Améliorations apportées au routage géographique glouton	44

3.4	Modèle du réseau et hypothèses de conception	45
3.5	Messages utilisés	46
3.6	Phases de fonctionnement	49
3.7	Multiple paires (source,sink)	54
3.8	Conclusion	57
 II Le tolérance aux pannes dans les Réseaux de Capteurs Multimédia Sans Fil (RCMSF)		59
4	Généralité sur la tolérance aux pannes dans les RCMSF	60
4.1	Introduction	61
4.2	Types de pannes	61
4.3	Procédure de tolérance aux pannes	64
4.4	Protocole de routage économe en énergie	65
4.5	Classification des techniques de tolérance aux pannes	67
4.6	Conclusion	71
5	Mécanismes de tolérance aux pannes dans les RCMSF	72
5.1	Introduction et motivations	73
5.2	Modèle d'énergie	74
5.3	Fonction objective pour le choix du prochain saut	76
5.4	Modélisation théorique du Nombre de Paquets Perdus	80
5.5	Mécanisme de réparation	82
5.6	Mécanisme de prévention	86
5.7	Conclusion	87
 III Les interférences dans les Réseaux de Capteurs Multimédia Sans Fil (RCMSF)		89
6	Modèles, mécanisme et métrique pour la gestion des interférences	90
6.1	Introduction	91
6.2	Modèle d'interférence	92
6.3	Une paire (source,sink) dans le réseau	93
6.4	Multiplés paires (source,sink)	96
6.5	Conclusion	101

IV	Evaluation des performances	102
7	Evaluation des performances par simulation	103
7.1	Introduction	104
7.2	TinyOS	104
7.3	Implémentation de GNMFT sous TinyOS	106
7.4	TOSSIM	109
7.5	Scénario de simulation	110
7.6	Métriques mesurées	113
7.7	Résultats de simulation	114
7.8	Conclusion	121
8	Evaluation des performances par expérimentation matérielle	123
8.1	Introduction	124
8.2	Plateforme Imote2 (Intel Mote 2)	124
8.3	Architecture réseau	126
8.4	Résultats expérimentaux	127
8.5	Conclusion	132
	Conclusion générale et perspectives	133
A	Pseudo-codes	I
A.1	Geographic Multipath	I
A.2	Faulty-paths Curative Mechanism	IV
A.3	Energy-efficient Preventive Mechanism	VI
A.4	Non-interfering Multipath Mechanism	VII
B	Format de la trame et taille du paquet multimédia	X
B.1	Format de la trame <i>ChipCon Radio CC2420</i>	X
B.2	Taille du paquet multimédia utilisé dans la transmission	X
	Bibliographie	XII

Liste des figures

1.1	Architecture d'un capteur multimédia	10
1.2	Paramètres de configuration d'un capteur directionnel	11
1.3	Réseau de capteurs sans fil	11
1.4	Architecture de référence pour les RCMSF	13
1.5	Pile protocolaire dans les RCMSF	17
2.1	Classification des protocoles de routages dans les RCMSF	28
2.2	Suite de la classification des protocoles de routages dans les RCMSF	32
2.3	Stratégies du routage géographique	37
2.4	Différent type de disjonction de chemins	39
2.5	Niveaux de priorités pour un flux de données	40
3.1	Problème du minimum local dans le routage géographique glouton	44
3.2	Organigramme de la phase d'exploration du chemin	50
3.3	Organigramme de la phase d'optimisation du chemin	51
3.4	La construction de chemins (exploitation et optimisation)	52
3.5	Deux paires (source,sink) dans le réseau	54
3.6	Introduction d'une paire (source,sink) artificielle	55
3.7	Multiplés transmission dans GM	56
3.8	Exemple de sur-écoute	56
4.1	Différents types de pannes	62
4.2	Procédure de tolérance aux pannes	64
4.3	Classification des techniques de tolérance aux pannes	67
5.1	Modèle de dissipation d'énergie radio	75
5.2	Circuit radio de Friis	78
5.3	Exemple d'utilisation de la puissance de réception]	79

5.4	Nombre de paquets perdus (NPP)	82
5.5	Déroulement du mécanisme de réparation	84
5.6	Diagramme du mécanisme de réparation	85
5.7	Déroulement du mécanisme de prévention	87
6.1	Exemple du phénomène d'interférence	91
6.2	Modèle d'interférence	92
6.3	Noeuds interférents à un saut d'un chemin construit	94
6.4	Chemins non-interférents	96
6.5	Puissance du signal et interférence des voisins quand le nœud p envoie au nœud q	97
6.6	Fonction de densité de probabilité de SNR_{pq}^{dB}	99
6.7	Définition de la distance seuil d'interférence	99
6.8	Coefficient de probabilité d'erreur γ sur la distribution d'interférence	100
7.1	Modèle de composants de TinyOS	106
7.2	Couche de composants simplifiée pour l'implémentation de GNMFT	107
7.3	Architecture détaillée du protocole proposé sous TinyOS	108
7.4	Résultat de l'implémentation du modèle d'énergie	110
7.5	Topologie de simulation utilisée	112
7.6	<i>ForwardingSet</i> du nœud courant	112
7.7	Impact du nombre de chemins sur le taux de délivrance	115
7.8	Impact du nombre de nœuds défaillants sur le taux de délivrance	116
7.9	Impact du débit d'envoi sur le taux de délivrance	116
7.10	Impact du nombre de nœuds défaillants sur le nombre de paquets perdus	117
7.11	Impact du débit d'envoi sur le délai moyen de bout-en-bout	118
7.12	Energie consommée après 20, 60 et 100 évènements	119
7.13	Impact du débit d'envoi sur le débit de réception	120
7.14	Facteur d'équilibrage d'énergie	121
8.1	Capteur Imote2	124
8.2	Carte multimédia d'Imote2 (IMB400)	126
8.3	Scène de déploiement	127
8.4	Impact du débit d'envoi sur le taux de délivrance	128
8.5	Energie consommée après 20 détections	129
8.6	Impact du débit d'envoi sur le délai moyen de bout-en-bout	130
8.7	Facteur d'équilibrage d'énergie	131

8.8 impact du débit d'envoi sur le débit de réception	131
B.1 Format de la trame IEEE 802.15.4	X

Liste des tableaux

2.1	Différents niveaux d'exigence de QoS	30
2.2	Tableau comparatif des protocoles de routage dédiés aux RCMSF	35
3.1	Format du message de balisage (Beacon)	47
3.2	Structure de la table de voisinage	47
3.3	Format du message de contrôle	48
3.4	Format du message de données	49
5.1	Champs ajoutés au message d'exploration de chemins	83
5.2	nouveau format du message de balisage	86
7.1	Paramètres de simulation utilisés	111
8.1	Caractéristiques principales d'un capteur Imote2	125
8.2	Paramètres de tests utilisés	126

Introduction générale

Contexte

Depuis leur création, les réseaux de communication sans fil ont connu un succès sans cesse croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles, grâce à leurs avantages où ils ont pu s'instaurer comme acteur incontournable dans les architectures réseaux. Au cours de son évolution, le paradigme sans fil a vu naître diverses architectures dérivées, telles que : les réseaux cellulaires et les réseaux locaux sans fils. Durant ces deux dernières décennies, une fusion de deux pôles de l'informatique moderne, à savoir : les systèmes embarqués et les communications sans fil, a fait paraître une architecture nouvelle appelée "Réseau de capteurs sans fil (RCSF)" ou "Wireless Sensor Network (WSN)".

Sans une infrastructure fixe, un RCSF est un système qui interconnecte plusieurs nœuds capteurs constitués chacun d'une unité de captage, d'une unité de traitement et d'un bloc de communication. Dotés d'une portée réduite, les nœuds capteurs sont déployés dans une zone d'intérêt sensible et/ou difficilement accessible et disposent d'une réserve énergétique conservée dans des batteries, leur offrant ainsi une durée de vie limitée. La mission principale d'un RCSF est la collecte régulière ou sur demande d'un ensemble de paramètres/mesures scalaires, telles que la température, la pression et l'humidité, afin de les acheminer vers des points de traitement appelés puits/collecteurs/stations de bases ou encore sinks, pour les relayer après à grande échelle.

La croissance de la technologie en matière de miniaturisation des composants électroniques et la disponibilité de matériel à faible coût ont permis aux nœuds capteurs d'être équipés de modules de collecte d'informations visuelle et audio, ce qui a donné naissance aux Réseaux de Capteurs Multimédia Sans Fil (RCMSF). Cette nouvelle famille de réseaux est constituée de nœuds capables de stocker, traiter en temps réel, corrélérer et agréger les données multimédia provenant de plusieurs sources hétérogènes, permettant ainsi d'améliorer les applications existantes utilisant les RCSF classiques et également d'apporter une nouvelle aire d'applications novatrices avec une meilleure description de l'événement capturé.

Chaque nœud est en mesure de traiter les données (paquets) reçues, prendre une décision locale et la transmettre au nœud voisin le plus proche. En effet, les nœuds capteurs communiquent par radio à courte portée rendant de ce fait le transfert multi-sauts une nécessité pour que l'information capturée atteigne le sink. Cette tâche est confiée au protocole de routage implémenté au niveau de la couche réseau, qui se charge d'acheminer le trafic de bout-en-bout. Une approche simple serait l'utilisation du routage géographique qui permet le passage à l'échelle et garantit une progression positive des paquets.

Verrous scientifiques et motivations

En plus des contraintes héritées des réseaux de capteurs classiques relatives à l'énergie, au stockage et au temps de calcul, les protocoles de routage dédiés aux RCMSF se heurtent à plusieurs défis, notamment la garantie des Qualités de Service (QoS) et d'Expérience (QoE) exigées par la nature des flux multimédia.

Par ailleurs, les diverses raisons de défaillances qui affectent la fiabilité des nœuds lors de la transmission en temps réel de ce contenu volumineux (image, audio et vidéo), en particulier dans les contextes critiques ou les réseaux défectueux sujets aux erreurs, posent de nos jours un grand challenge aux protocoles de routage et demeurent une problématique ouverte dans les RCMSF. Compte tenu du très faible nombre de protocoles de routage qui ont approché la phase expérimentale et encore moins ceux qui ont abordé cette contrainte pendant l'acheminement des paquets en temps réel.

En effet, l'extinction d'un capteur suite à l'épuisement de sa batterie ou à sa destruction physique ainsi que les différentes formes de dysfonctionnements opérationnels durant le transfert des données, provoquent les ruptures des liens de communications et engendrent un changement considérable dans la topologie. Cela impacte directement sur les fonctions de base telles que la couverture et la connectivité et entrave le fonctionnement du réseau.

De plus, le coût excessif du redéploiement dans certains domaines et l'environnement hostile dans lequel les nœuds sont déployés où il est quasiment envisageable de remplacer un capteur défaillant ou sa batterie en raison de leur incorporation directe dans les infrastructures urbaines tels les ponts, présentent en cas de panne, un handicap pour la réorganisation du réseau. Face à une telle situation, la durée de vie globale diminue et entraîne des conséquences dangereuses.

D'un autre côté, le déploiement dense avec une portée de transmission assez large et le mode de progression en multi-chemins recommandé pour les RCMSF ainsi que la nature variable du canal radio affecté par diverses sources de bruits, génèrent des chevauchements de

couverture et des collisions des paquets entre les routes adjacentes, particulièrement lors des livraisons simultanées. Par conséquent, un autre grand problème surgit, relatif aux interférences, qui réduisent la fiabilité des données transmises.

Contributions

Dans ce contexte et afin de remédier à toutes ses contraintes, nous proposons dans le cadre de cette thèse, un nouveau protocole de routage géographique tolérant aux pannes avec une transmission sur plusieurs chemins non-interférents, baptisé GNMFT (*Geographic Non-interfering Multipath Fault Tolerant*). En effet, le protocole développé est adaptatif aux changements avec un fonctionnement hybride à contraintes multiples défini dans une fonction objective multicritères. Il intègre des approches et solutions validées à grande échelle par simulation et à petite échelle via une expérimentation réelle sur un banc d'essai. Ainsi, les contributions de cette thèse de doctorat peuvent être résumées comme suit :

1. La 1^{ère} contribution que nous proposons est relative au protocole de routage géographique multi-chemins GM (*Geographic Multipath*) qui prend en charge les différentes phases, de la découverte des routes jusqu'à l'envoi effectif des données. En effet, GM optimise et pousse les limites du routage géographique glouton tout en contournant les trous statiques. Il supporte également les transferts simultanés et exploite l'interdépendance qui existe entre les couches de la pile protocolaire.
2. La 2^{ème} contribution concerne l'introduction de la métrique énergétique (énergie résiduelle et énergie initiale) ainsi que la puissance de réception, comme paramètres dans la fonction objective du choix du prochain saut. L'objectif est d'alléger les trajets optimaux et d'assurer un bon équilibrage de charge dans le réseau, ce qui prolonge positivement sa durée de vie et augmente la probabilité de réception.
3. La 3^{ème} contribution correspond au modèle théorique relatif au nombre de paquets perdus (NPP) pendant la livraison des flux de données en temps réel. En effet, tous les protocoles de routages étudiés dans la littérature ne prennent pas en compte la formation des trous dynamiques dans le réseau. Ces derniers engendrent des pertes significatives et peuvent fausser ou distordre le contenu transmis.
4. La 4^{ème} contribution traite les pannes soudaines, liées aux défaillances matérielles, des destructions physiques ou changements de topologie. A cet effet, le mécanisme curatif des chemins défectueux nommé FCM (*Faulty-paths Curative Mechanism*) intervient lorsque le nœud qui précède le nœud défaillant s'aperçoit de la disparition de son successeur via

les acquittements négatifs après un certain nombre d'envois. Le but étant d'empêcher les pertes de paquets et d'augmenter le taux de fiabilité.

5. La 5^{ème} contribution est relative au mécanisme de prévention EPM (*Energy-efficient Preventive Mechanism*) qui est déclenché quand l'énergie résiduelle du nœud atteint un seuil critique au moment de la progression en temps réel. La finalité est d'anticiper l'épuisement précoce des batteries, ce qui permet de maintenir les liens de communication opérationnels sans aucune perte ni interruption.
6. La 6^{ème} contribution présente primo, le modèle d'interférence lors de l'acheminement des flux sur multiples trajets et secundo le nouveau mécanisme de chemins non-interférents NMM (*Non-interfering Multipath Mechanism*). Ce dernier opère durant la phase de construction des routes en écoutant les messages d'optimisation afin de limiter les interactions et collisions des paquets de données entre les itinéraires adjacents.
7. La 7^{ème} contribution s'oriente vers le modèle de perte de chemins relatif au chevauchement des couvertures radios pendant les transmissions simultanées (parallèle ou croisé) dans un environnement multi-paires (source,sink). A cet effet, une nouvelle métrique relative aux interférences a été introduite dans la fonction objective de sélection.

Organisation du Mémoire

Pour répondre à cet objectif, ce manuscrit comporte huit (8) chapitres, organisés en quatre (4) grandes parties.

Avant de détailler les différentes parties, nous introduisons un 1^{er} chapitre qui présente quelques généralités liées aux RCMSF. A cet effet, nous nous intéressons au capteur multimédia, puis nous nous focalisons sur les différents volets de base, à savoir : la description, les principales caractéristiques, l'architecture typique et les domaines d'application. Nous mettons par la suite en évidence la qualité de service ainsi que le modèle de communication d'un RCMSF et nous introduisons en dernier les facteurs influençant leur conception.

La 1^{ère} partie concerne le routage et est divisée en deux chapitres :

- Dans le chapitre 2, nous dressons une classification des protocoles de routages existants trouvés dans la littérature, en s'appuyant essentiellement sur le principe de conception et le mode de fonctionnement. Le but étant de ressortir les avantages et les inconvénients, pour dégager les principales caractéristiques d'un bon protocole de routage. Nous présentons, par la suite le routage géographique et ses différentes stratégies d'achemine-

ment de paquets ainsi que la transmission sur plusieurs chemins.

- Le chapitre 3 sera consacré à notre première contribution relative au protocole de routage géographique multi-chemins. A cet effet, nous mettons l'accent sur sa conception hybride qui tire profit des approches réactive et proactive et nous clarifions notre méthode de sélection poussant ainsi la limite du routage glouton connu sous le nom de "*Minimum Local*". Par la suite, nous détaillons les messages utilisés et les différentes phases de fonctionnement qui représentent d'une part le cœur de notre protocole, et d'autre part, une base pour nos prochaines contributions.

La 2^{ème} partie correspond à la tolérance aux pannes et est également divisée en deux chapitres :

- Dans le chapitre 4, nous nous focalisons en premier sur l'identification et la catégorisation des pannes qui peuvent surgir dans le réseau sous diverses formes. Puis nous présentons une procédure générale pour les traiter sur plusieurs étapes. Par la suite nous nous intéressons à certains protocoles de routages économes en énergie. En dernier, nous dressons une classification des techniques tolérantes aux pannes qui représentent des solutions dans ce domaine.
- Le chapitre 5 regroupe nos contributions citées auparavant, à savoir :
 - Fonction objective multi-critères du choix de prochain saut;
 - Modèle théorique du nombre de paquets perdus;
 - Mécanisme de réparation des chemins défectueux;
 - Mécanisme de prévention sur l'épuisement des batteries.

La 3^{ème} partie gère les interférences et comprend le chapitre 6 où nous détaillons :

- Modèle d'interférence;
- Mécanisme de chemins non-interférents;
- Modèle de perte de chemins et probabilité d'erreur;
- Métrique d'interférence dans la fonction objective.

La 4^{ème} partie présente les tests de performances et les résultats obtenues de nos contributions effectuées en deux étapes :

- Sur la plateforme logicielle TinyOS via le simulateur TOSSIM où nous avons utilisé deux topologies régulière dont une très dense afin d'observer le phénomène d'interférence;
- Sur la plateforme matérielle Imote2 où nous avons déployés d'une manière statique déterministe 29 capteurs dont une paire (source,sink).

Enfin, le présent manuscrit se termine par une conclusion générale et quelques perspectives pour d'éventuels travaux de recherche futurs.

Publications faites dans le cadre de la thèse

Conférences internationales

1. Mohamed Nacer Bouatit, Selma Boumerdassi and Adel Djama. "Experimental Evaluation of Fault-Tolerant Mechanisms over Imote2 Platform". in Proc. Of the IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, Jan. 12-15, 2018, pp. 1-4.
2. Mohamed Nacer Bouatit, Selma Boumerdassi, Adel Djama and Ruben H. Milocco. "Energy-Efficient Preventive Mechanism for Fault Tolerance in Wireless Multimedia Sensor Networks". in Proc. Of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Toronto, ON, Canada, Sept. 24-27, 2017, pp. 1-5.
3. Mohamed Nacer Bouatit, Selma Boumerdassi. "Dynamic Curative Mechanism for Geographic Routing in Wireless Multimedia Sensor Networks". in Proc. Of the International Conference on Computer Networks and Communications (CCNET), Dubai, UAE, April. 28-30, 2017, pp. 99-108.
4. Mohamed Nacer Bouatit, Selma Boumerdassi, Pascale Minet and Adel. Djama. "Fault-Tolerant Mechanism for Multimedia Transmission in Wireless Sensor Networks". in Proc. Of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Montreal, QC, Canada, Sept. 18-21, 2016, pp. 1-6.
5. Mohamed Nacer Bouatit, Selma Boumerdassi and Adel Djama. "A Geographic Multipath Routing Protocol for Wireless Multimedia Sensor Networks". in Proc. Of the International Conference on Mobile, Secure, and Programmable Networking (MSPN), Paris, France, June. 1-3, 2016, pp. 99-108.

En cours de soumission dans des conférences internationales

1. Mohamed Nacer Bouatit, Selma Boumerdassi. "Non-interfering Multipath Geographic Routing for WMSNs". on the ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc (PE-WASUN), Montreal, Canada, Oct. 28 to Nov. 2. 2018.
2. Mohamed Nacer Bouatit, Selma Boumerdassi and Ruben H. Milocco. "Efficient Relays Selection for Multipath Data Transmission in Fading Channels". on the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, UAE, Dec. 9-13, 2018.

Chapitre 1

Réseau de Capteur Multimédia Sans Fil

Sommaire

1.1 Introduction	8
1.2 Capteur multimédia	9
1.2.1 Anatomie	9
1.2.2 Caractéristiques	10
1.3 Réseau de Capteur Multimédia Sans Fil	11
1.3.1 Description	11
1.3.2 Caractéristiques	12
1.3.3 Architecture	13
1.3.4 Domaines d'application	14
1.4 La Qualité de Service dans les RCMSF	16
1.5 Modèle de communication des RCMSF	17
1.5.1 Couches de communication	18
1.5.2 Plans de gestion	20
1.6 Facteurs influençant la conception des RCMSF	21
1.7 Conclusion	23

1.1 Introduction

Les récentes avancées technologiques des systèmes microélectroniques connus sous le nom de MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems), des technologies sans fil, et des systèmes embarqués, ont permis le développement de petits objets communicants appelés "Capteurs". Ces derniers sont dotés de capacités embarqués de traitement, de stockage, de détection et de communication sans fil et sont déployés en centaines dans une zone géographique difficiles d'accès formant ainsi un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) également connu sous le nom de WSN (Wireless Sensor Networks).

Un RCSF peut alors être défini comme un système autonome et dynamique, composé de nœuds statiques ou mobiles. Ces derniers sont inter-connectés par des liens sans fil, sans l'aide d'aucune administration centralisée ni d'infrastructure. Un RCSF a pour tâche principale de prendre les mesures scalaires des phénomènes physiques, tels que la température, la pression et l'humidité ainsi que la localisation et le suivi des objets.

A l'heure où les communications sans fil se sont imposées de façon indéniable et connaissent un essor fulgurant, le progrès de la technologie CMOS (Complementary Metal-Oxide Semi Conductor) et la disponibilité de composant électronique miniaturisé à faible puissance et à faible coût tels que les caméras et microphones ont favorisé la création d'une nouvelle instance particulière de capteur référée dans la littérature par Réseaux de Capteurs Multimédia Sans Fil (RCMSF), également connu sous le nom de WMSN (Wireless Multimedia Sensor Networks). Cette nouvelle famille ouvre de nouvelles perspectives pour un large éventail d'applications et constituent de plus en plus, une technologie émergente permettant aux utilisateurs un accès à l'information et aux services électroniques indépendamment de leurs positions géographiques. Les débits atteints rendent possible le transfert de flux multimédia soumis à de fortes contraintes.

L'élément de base d'un RCMSF est le capteur, c'est pourquoi, dans ce chapitre, nous nous intéressons dans un premier temps au capteur multimédia, puis nous nous focalisons sur les différents volets des RCMSF : la description, les principales caractéristiques, l'architecture typique et les domaines d'application. Nous mettons par la suite en évidence la qualité de service ainsi que le modèle de communication d'un RCMSF et nous introduisons en dernier les facteurs influençant leur conception.

1.2 Capteur multimédia

1.2.1 Anatomie

Un capteur multimédia est composé de plusieurs unités de base : une unité de capture, une unité de traitement (CPU : Central Processing Unit), un sous-système de communication, un sous-système de coordination, une unité de stockage (mémoire), une unité optionnelle de mobilité et d'actionnement et enfin une unité de contrôle d'énergie, également appelée unité de puissance. Un capteur peut contenir suivant son domaine d'application des modules supplémentaires tel qu'un système de localisation GPS et un système générateur d'énergie (cellule solaire). La figure 1.1 illustre l'architecture d'un capteur multimédia.

- L'unité de capture, également appelée unité d'acquisition, est généralement composée de deux sous-unités : les capteurs (caméra, microphone et/ou capteur scalaire) et un convertisseur analogique/numérique (ADCs). Le capteur fournit des signaux analogiques basés sur le phénomène observé qu'il transmet ensuite au convertisseur. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.
- L'unité de traitement qui représente le cœur d'un capteur, est interfacée avec l'ensemble des composants (stockage, puissance et acquisition) et comporte un processeur qui fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les capteurs. Elle prend en charge le traitement de toutes les données pertinentes et l'exécution des programmes systèmes chargés de coordonner les différentes tâches de la détection jusqu'à la communication.
- Le sous-système de communication est responsable de la transmission de données sur un médium sans fil et permet de relier le capteur au réseau. Il utilise les moyens habituels de communication tel que les fréquences radio, les ultrasons et l'électromagnétiques en rapport avec l'application souhaitées. Il est composé d'une unité émettrice-réceptrice et d'un logiciel de communication.
- Le sous-système de coordination est chargé de coordonner le fonctionnement de différents dispositifs du réseau en effectuant des opérations telles que la synchronisation du réseau et la gestion de l'emplacement. L'unité optionnelle de mobilité/actionnement permet le mouvement ou la manipulation d'objets.
- L'unité de contrôle d'énergie généralement constituée d'une batterie, alimente et répartie l'énergie disponible sur l'ensemble des modules. Elle permet également de réduire la consommation d'énergie en mettant en veille les composants inactifs et gérer les systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé comme les cellules

solaires.

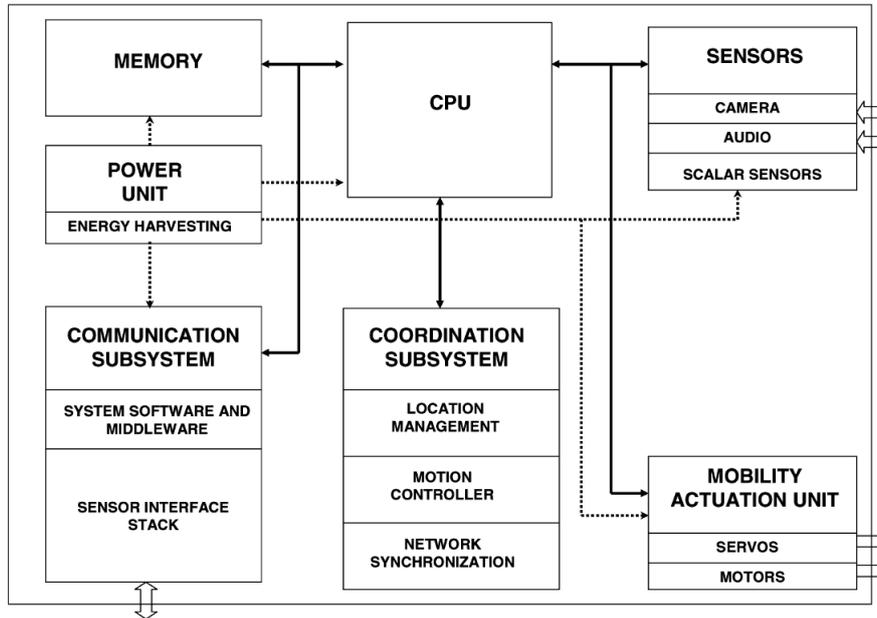


FIGURE 1.1 – Architecture d'un capteur multimédia [1]

1.2.2 Caractéristiques

Doté d'une caméra embarquée, le capteur multimédia apporte une meilleure description aux phénomènes observés et est en mesure de stocker, traiter en temps réel, corrélérer et agréger, en plus des grandeurs scalaires, le contenu multimédia. La principale caractéristique de ce type de capteurs qui le distingue des capteurs classiques est le modèle de couverture. En effet, le capteur de grandeurs scalaires, tels que la température, la pression et la lumière suit un modèle omnidirectionnel, tandis que le capteur multimédia a une perception sectorielle multidimensionnelle et suit une direction bien précise appelée champ de vision (FoV : Field of Vision)[2].

Le champ de vision est caractérisé par plusieurs paramètres : l'angle avec la verticale, l'ouverture et le rayon de détection de la caméra comme illustré dans la Figure 1.2. Le grand challenge étant de trouver une configuration optimale qui permet à la fois, d'élargir la couverture de la zone d'intérêt tout en minimisant le nombre de capteurs déployés.

Le capteur multimédia est doté de capteur d'image de type CMOS capable de capturer et traiter une image optique à l'aide d'une seule puce intégrée contrairement à la technologie classique, dite appareil de couplage de charge CCD (Charge Coupled Device), qui est plus chère et requiert plusieurs puces. La puce CMOS intègre une lentille, un capteur d'image et des algorithmes de traitement d'images, en plus d'un stabilisateur et d'un compresseur d'image. De

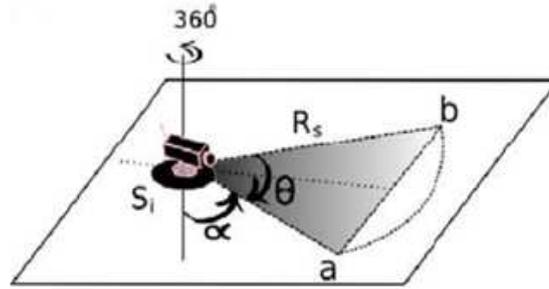


FIGURE 1.2 – Paramètres de configuration d'un capteur directionnel [3]

(α : Angle avec la verticale, θ : ouverture de la caméra, R : Rayon de détection)

plus, la qualité d'image CMOS est équivalente à celle des CCD dans le cas de faible et moyenne résolution. Les caméras utilisées sont plus petites, plus légères et consomment moins d'énergie, et par conséquent, cette technologie est la plus appropriée pour les RCMSE.

1.3 Réseau de Capteur Multimédia Sans Fil

1.3.1 Description

Les RCMSE sont un cas particulier des réseaux ad-hoc, dans lesquels les nœuds sont des capteurs intelligents. Chaque capteur est un composant physique capable d'accomplir trois tâches complémentaires : le relevé d'une grandeur, le traitement de l'information et la transmission vers d'autres capteurs en se servant des liens radio pour le partage d'information et le travail collaboratif. Les nœuds échangent leurs informations afin d'établir une vue globale de la région à surveiller où de la zone d'intérêt (ZoI).

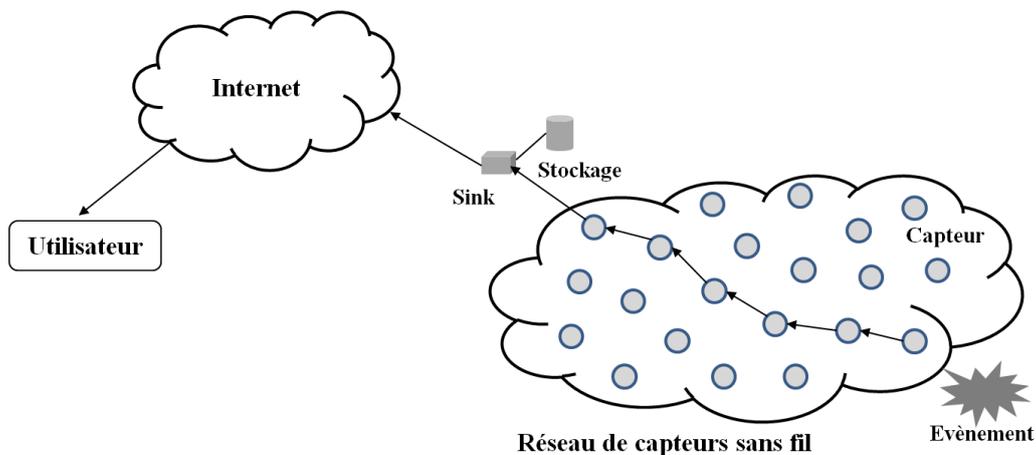


FIGURE 1.3 – Réseau de capteurs sans fil

Les nœuds sources communiquent les données collectés à travers plusieurs nœuds inter-

médiaires en se basant sur une architecture multi-sauts à un point de collecte ou/et de trainement appelé puit/collecteur/station de base et également sink. Ce dernier, doté de capacités plus élevées, sert de relais pour la transmission des données reçues par internet ou par satellite à l'utilisateur final pour analyse et prise de décision.

1.3.2 Caractéristiques

Une caractéristique essentielle des RCMSF réside dans le fait qu'ils sont équipés de faibles ressources en termes de mémoire, processeur et énergie. Ils fonctionnent en mode diffusion (broadcast) et partagent les informations recueillies par voie hertzienne, ce qui permet la facilité et la rapidité du déploiement. Néanmoins, l'aspect de sécurité reste limité.

On distingue deux manières de déploiement. Le déploiement aléatoire, tel le largage depuis un hélicoptère dans les environnements dangereux ou inaccessible et le déploiement déterministe statique ou mobile d'une façon étudiée. Cependant, toute intervention humaine après le déploiement est pratiquement inconcevable, c'est pourquoi on considère qu'une fois déployés, les capteurs doivent être autonomes et le réseau doit s'autogérer.

La raison d'être des réseaux ad-hoc en général, et des réseaux de capteurs, en particulier, est l'absence d'infrastructure préalable ainsi que toute administration centralisée. Les RCMSF se distinguent par un grand nombre de capteurs qui peut atteindre plusieurs centaines et en raison de leur mode de fabrication industriel en grandes séries, le contrôle du bon fonctionnement de chaque capteur est pratiquement irréalisable.

Par ailleurs, certains capteurs présentent des défaillances matérielles et tombent en panne rapidement, c'est pour quoi, le déploiement à forte densité est généralement envisageable afin de garantir la fiabilité des données transmises. En revanche, cette approche préventive, provoque les collisions des paquets et rend le réseau sensible aux interférences.

Le partage du médium de transmission est une propriété inévitable pour les communications sans fil, ce qui a pour effet de réduire la bande passante allouée aux capteurs. Par ailleurs, la nature vulnérable des communications radios peut bien être à l'origine des erreurs de transmission et des pertes de données.

Un RCMSF peut évoluer même après son déploiement, soit pour étendre davantage le réseau ou pour compenser l'extinction d'un certain nombre de capteurs après un temps de fonctionnement. De plus, les capteurs peuvent être embarqués dans des objets mobiles se déplaçant d'une façon arbitraire ou contrôlée, rendant ainsi la topologie du réseau dynamique et évolutive.

La limitation des ressources énergétiques est l'une des caractéristiques les plus critiques

dans un RCMSF. Les applications multimédia véhiculent une masse importante de données qui nécessite une grande consommation énergétique. Cette dernière est due essentiellement à l'interface radio qui est presque aussi gourmande en émission qu'en réception. De ce point de vue, le capteur doit minimiser ses dépenses énergétiques, en termes de calcul et de stockage. La durée de vie du réseau dépend de celle des capteurs et se calcule par rapport au premier nœud qui tombe en panne.

1.3.3 Architecture

Les RCMSF peuvent contenir plusieurs types de capteurs : scalaire ou multimédia, de faible ou de haute performances. Ces capteurs hétérogènes avec une différenciation d'autonomie coopèrent entre eux pour exécuter des tâches précises dans la zone d'intérêt. Le contenu multimédia recueilli est transmis à travers un chemin multi-sauts à une passerelle sans fil reliée à une unité de stockage qui est en mesure de le stocker localement pour une exploitation ultérieure.

Afin de bien traiter cette variété du trafic généré, une conception d'architecture flexible et hétérogène est nécessaire. La figure 1.4 présente une architecture de référence pour les RCMSF en fonction des exigences des différentes applications où trois types sont représentés : monocouche plate et homogène, monocouche groupée et hétérogène et multicouche groupé et hétérogène.

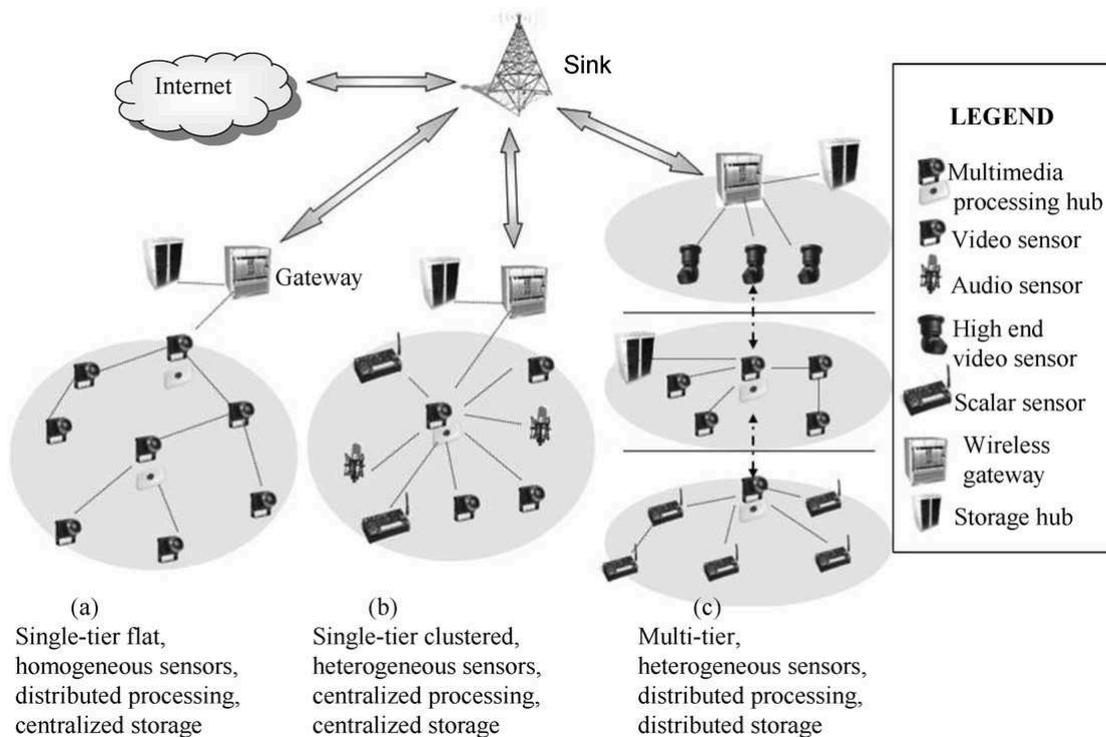


FIGURE 1.4 – Architecture de référence pour les RCMSF [4]

Dans une architecture monocouche plate et homogène (a), deux types de capteurs peuvent être déployés. Des capteurs multimédia avec les mêmes capacités physiques et un sous-ensemble de capteurs possédant des capacités de traitement plus élevées dénommés "*Processing Hub*". Ces derniers sont responsables du traitement des données tels l'agrégation et la suppression des paquets redondants. L'union de ces deux types de sous-ensembles constitue une architecture de traitement distribuée et de stockage centralisé.

L'architecture monocouche groupée et hétérogène (b), est composée de capteurs hétérogènes (multimédias et scalaires basiques), où les capteurs dans le cluster collectent les informations souhaitées et les envoient au cluster central. Ce dernier possédant plus de ressources et de puissance de calcul, traite les données recueillies et les transmet par la suite au hub de stockage via une passerelle sans fil. Cette architecture représente une approche centralisée de traitement et de stockage.

L'architecture multicouches groupée et hétérogène (c), comprend comme son nom l'indique, plusieurs couches imbriquées, à savoir : une couche plate de capteurs scalaires pour les tâches simples de collecte de grandeurs scalaires à partir de l'environnement, une couche de capteurs multimédia capable de récupérer le contenu multimédia et en dernier une couche de capteurs vidéo de haut de gamme pour effectuer les tâches complexes et transmettre les données au hub de stockage. Cette structure hiérarchique permet la flexibilité de l'utilisation des ressources de manière adaptative et offre des avantages considérables en termes d'évolutivité du réseau. Elle permet également de minimiser les coûts de transmission, fournir une meilleure couverture et assurer la fiabilité des données transmises. Dans cette architecture, le traitement et le stockage de données se font d'une manière répartie au niveau de chaque niveau.

1.3.4 Domaines d'application

Les progrès scientifiques dans la miniaturisation des composants électroniques et systèmes embarqués, la convergence des moyens de communication et l'apparition de réseaux ubiquitaires ont un grand impact sur l'évolution des RCMSE. Cela a pour conséquence, d'apporter une nouvelle aire d'applications novatrices et un large domaine d'utilisation, à savoir :

- **Applications militaires :** comme dans le cas de la majorité des technologies, le domaine militaire a été le moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation ainsi que la tolérance aux pannes sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil adéquat dans un tel domaine. Dans ce contexte, l'utilisation des capteurs multimédia permettent la transmission en temps réel d'images pertinentes du champ de bataille ou d'endroits stratégiques

et difficile d'accès ou même infectés. Le but étant de surveiller les mouvements des forces ennemies, repérer les cibles potentiels et analyser le terrain avant d'y envoyer les troupes.

- **Applications sécuritaires :** l'utilisation des capteurs multimédia dans le domaine de sécurité diminue considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux sensibles et publics et fournit un outil précis d'aide à la décision, relatif aux activités susceptibles d'être dangereuses, tels les vols, les intrusions et les accidents de la route.
- **Applications médicales :** l'implantation sous la peau de mini capteurs permet de recevoir des images en temps réel d'une partie du corps et ainsi de suivre la progression d'une maladie ou la reconstruction d'un muscle.
- **Applications sportives :** l'évolution des réseaux de capteurs multimédia est utilisée de plus en plus dans le domaine sportif, à savoir : les systèmes de calcul de trajectoires (tennis) et les systèmes de détection d'erreurs d'arbitrage (football).
- **Applications véhiculaires :** en plus des systèmes intelligents d'aide aux stationnements (caméra intégrée), les RCMSF permettent également d'apporter un aspect sécuritaire aux systèmes de freinage et de correction de trajectoires protégeant ainsi les vies humaines.
- **Applications environnementales :** les RCMSF permettent la récolte des flux acoustiques, détection de feu de forêt et d'inondation pour les transmettre en un temps opportun aux organismes concernés. A titre d'exemple, les réseaux de capteurs vidéo sont fortement utilisés par les océanographes afin de déterminer l'évolution des bancs de sable en utilisant des techniques de traitement d'images.
- **Applications de suivis/localisations :** le contenu multimédia (image ou vidéo) associé à des techniques avancées de traitement du signal et d'images sont largement utilisés pour la localisation et le suivi des personnes recherchées.
- **Applications commerciaux :** grâce à leur module vidéo, les capteurs multimédia sont intégrés dans les processus de stockage et de livraison. Le réseau pourra par conséquent, connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Pour les entreprises manufacturières, les RCMSF permettent de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final.
- **Applications domotiques :** le déploiement des capteurs multimédia dans les maisons dites intelligentes permet d'enrichir les dispositifs domestiques existant et d'apporter de nouvelles fonctionnalités tel le mode de visite interactif. De plus, le déclenchement adéquat d'alarme anti-intrusion en s'appuyant sur des captures d'images réelles est fortement favorable au détriment des détections de mouvement par infrarouge.

1.4 La Qualité de Service dans les RCMSF

La garantie de la QoS est l'un des grands défis dans les RCMSF. Elle peut être définie comme la capacité à garantir un certain niveau de service, de sorte que les contraintes des applications soient satisfaites. La QoS peut également correspondre dans un réseau, à un ensemble de mécanismes permettant de partager équitablement, selon les besoins requis des applications, les différentes ressources du réseau.

En plus des modes de transmission de données conventionnels connus des capteurs scalaires, les données multimédias incluent les flux audio et vidéo. Nous citons à titre d'exemple, les images instantanées et le streaming vidéo. Le premier type de données contient des observations d'événements obtenus dans une courte durée de temps (Snap shot multimedia content). En revanche, le streaming vidéo est généré dans des périodes plus longues et exige une continuité de livraison.

Dans ce contexte, une base solide est nécessaire en termes de matériels et d'algorithmes afin de fournir la QoS requise. En effet, la grande quantité des flux multimédia transmise au collecteur pour analyse et prise de décision, se traduit par un ensemble de métriques mesurables en termes de bande passante (débit), de délai de transmission de bout-en-bout et de taux de délivrance (fiabilité). Tandis que les solutions proposées pour les RCSF classique avaient comme unique préoccupation la préservation de l'énergie.

Par ailleurs, le traitement et le transfert efficace du contenu multimédia a été abordé comme un problème isolé dans la conception du réseau, à quelques exceptions tels le codage du canal source commun et le streaming adaptatif du canal [1]. Toutefois, le traitement et le routage de ce type de contenu ne sont pas indépendants et leur interaction a un impact majeur sur les niveaux de la QoS fournis. Les RCMSF permettent l'exécution d'algorithmes de traitement sur les données multimédia brutes recueillies afin de réduire la charge de transmission en compressant les images et les vidéos. Le challenge à relever dans ce cas de figure est que les nœuds capteurs sont équipés de processeur de faible puissance et d'une mémoire limitée, ne correspondent pas aux systèmes de codage proposés pour une complexité de calcul élevée. La réduction du débit de données en utilisant le codage vidéo distribué (DVC) [5] et les algorithmes de compression d'image de faible complexité sont nécessaires afin de compresser les données massives en temps réel dans des fichiers beaucoup plus petits.

De plus, dans les réseaux filaires, la capacité de chaque lien (canal) est supposée fixe et prédéterminée, tandis que, dans les réseaux sans fil à multi-sauts, la capacité de chaque liaison sans fil dépend du niveau d'interférence perçue à chaque récepteur et les politiques de contrôle de puissance et de débit employés par l'émetteur. Par conséquent, la capacité et la

latence atteignables à chaque lien dépendent de l'emplacement de ce dernier et varient continuellement, rendant ainsi la garantie de la transmission de bout-en-bout une tâche difficile. En outre, il existe une interdépendance entre les fonctions traitées par toutes les couches de la pile de communication. Ces fonctionnalités gérées sur différentes couches sont fortement couplées, en raison de la nature partagée du canal de communication sans fil.

Les RCMSF ont plusieurs particularités qui font que la garantie de la QoS lors de la transmission du contenu multimédia soit difficile et parfois inexplorée. En effet, les capteurs multimédia sont contraints en termes d'énergie, de mémoire, de capacité de traitement et de débit de transmission. D'autre part, les RCMSF doivent aussi prendre en charge et satisfaire un niveau acceptable de la Qualité d'Expérience (QoE). A titre d'exemple, dans une application multimédia critique ne tolérant pas la perte, le transfert des paquets de données volumineux consiste à attribuer des priorités différentes pour chaque type de données (image et son). La perte des trames de références (comme les premières trames) conduit à une distorsion importante de la vidéo, ce qui donne une mauvaise expérience humaine [6].

1.5 Modèle de communication des RCMSF

Dans les RCMSF, le modèle de communication peut être fait selon l'approche traditionnelle de la pile protocolaire qui comprend plusieurs couches ou bien en utilisant l'approche inter-couches, également appelée multicouches telle décrite dans la figure 1.5. Cette approche est connue sous sa terminologie anglophone "*Cross-layer*" où le modèle combine trois plans de gestion verticaux pour assurer les fonctionnalités inter-couches, à savoir : la gestion de mobilité du réseau, la coordination des tâches entre les capteurs et le partage des ressources en utilisant judicieusement l'énergie disponible.

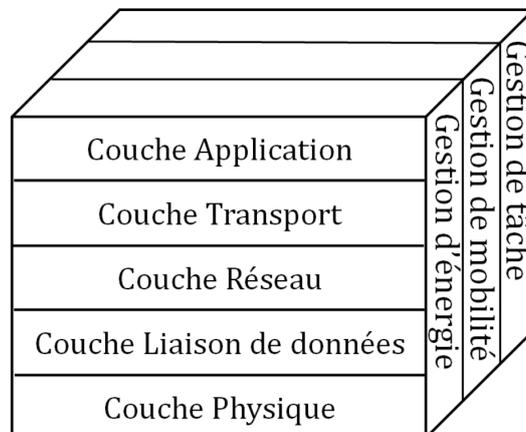


FIGURE 1.5 – Pile protocolaire dans les RCMSF

1.5.1 Couches de communication

- **Couche application** : assure l'interface avec les applications et considérée comme le niveau le plus proche des utilisateurs géré directement par les logiciels. Elle prend en charge les différents types de logiciels d'application construits et offre plusieurs services :
 - Le contrôle d'admission et la gestion du trafic, en empêchant les applications de transmettre les flux de données lorsque les ressources réseau nécessaires ne sont pas disponibles;
 - Le codage à la source en fonction des exigences des applications et des contraintes matérielles;
 - La fourniture des logiciels flexible et efficaces pour exporter les services et interagir avec d'autres applications.

Les exigences de la QoS sont considérées comme des critères d'admission d'applications pour les réseaux de capteurs classiques. Ces approches prennent en considération la QoS au niveau applicatif de manière uniforme pour toutes les applications. En revanche, elles ne tiennent pas compte simultanément des exigences multiples requises tels le délai de transmission, la fiabilité et la consommation d'énergie. D'où la nécessité de gérer l'admission des flux multimédias en fonction de la QoS requise par la couche application.

- **Couche transport** : dans les applications qui requièrent un haut débit, la couche transport joue un rôle important en assurant une fiabilité de bout-en-bout avec des mécanismes de contrôle de congestion. Particulièrement dans le RCMSE, plusieurs fonctionnalités sont assurées par la couche transport afin de répondre aux exigences des données multimédia, notamment :
 - **L'effet de congestion** : dans les RCMSE, l'effet de congestion est plus fréquent par rapport aux réseaux de capteurs traditionnels. Ce goulot d'étranglement se produit quand un capteur est submergé de paquets provenant d'un/plusieurs flux multimédias à débit élevé, ce qui provoque des collisions, des pertes des paquets et un épuisement rapide d'énergie. Tandis que les applications fonctionnant sur les réseaux traditionnels subissent seulement une dégradation de performances où la perte d'énergie due aux retransmissions entraîne une partition du réseau. C'est pourquoi, les algorithmes de contrôle de congestion doivent apporter une réponse immédiate et éviter l'affaiblissement du débit sur les chemins affectés.
 - **La réorganisation des paquets due aux multi-chemins** : plusieurs chemins peuvent exister entre les paires (source-sink) et l'ordre de livraison de paquets est forte-

ment influencé par les caractéristiques de la route choisie. En effet, dans les applications qui demandent des flux en temps réel ou en continu, les données inutilisées dans la séquence appropriée deviennent redondantes, nécessitant ainsi un ré-ordonnement des paquets par la couche transport.

- **Couche réseau** : chargée de trouver des chemins de transmissions fiables pour router les paquets de données fournies par la couche transport tout en optimisant l'utilisation de l'énergie et assurant la QoS requise par les applications. De plus, cette couche sert de médiateur entre la couche MAC (*Medium Access Control*) et la couche application pour l'échange de paramètres de performance [3]. En outre, face à l'incapacité de la couche MAC à connaître les caractéristiques point à point entre les différents liens du réseau, la couche réseau se charge de faire correspondre les paramètres de la QoS exigés par la couche application aux paramètres de performance de la couche MAC.

Dans ce contexte, la couche réseau a une tâche difficile où chaque flux transporté a ses propres exigences de QoS qui doivent être prises en charge. Cependant, elle doit garantir les paramètres de QoS selon les données transmises telles les données à faible/haut débit et à temps critiques.

La tâche du protocole de routage est assez complexe dans les RCMSF, en raison de l'indisponibilité des ressources requises par les applications spécifiques. Ainsi le 2^{ème} chapitre sera consacré aux protocoles de routage dédiés aux RCMSF.

- **Couche liaison de données** : spécifie comment les données sont expédiées entre deux nœuds dans une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des données, du contrôle d'erreurs et d'accès au média (MAC). Ce dernier permet un transfert de données fiable et sans erreur avec des retransmissions minimales en prenant en charge les exigences spécifiques de la QoS.

De plus, le trafic multimédia est réparti sur différentes classes de services et soumis à des politiques de gestion de mémoire (*Buffering*), d'ordonnement et de transmission. A titre d'exemple, le standard de compression d'images JPEG2000 (*Joint Photographic Experts Group*) intègre une fonctionnalité, appelée RoI (*Region of Interest*) applicable à la détection de données visuelles. En effet, elle permet l'attribution d'une plus grande importance à certaines parties de l'image qui peuvent être ensuite codées et transmises sur une liaison de meilleure qualité avec une priorité élevée. Cette fonctionnalité est utilisée dans les applications de surveillance en attribuant différentes RoI aux paquets.

Par ailleurs, les principales causes de perte d'énergie dans les RCMSF sont dues principalement à la retransmission des paquets suite aux collisions, à l'écoute inactive et à la

sur-écoute où les circuits d'émission-réception des capteurs restent actifs en l'absence de transmission de données. A cet effet, plusieurs protocoles MAC ont été développés afin d'ordonner l'accès au canal, contrôler les erreurs et multiplexer les données en s'appuyant sur des méthodes centralisées, telles que FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), TDMA (*Time Division Multiple Access*) et CDMA (*Code Division Multiple Access*).

- **Couche physique** : se charge de la transmission et la réception des paquets de données entre les nœuds capteurs d'une manière robuste et efficace, en utilisant des convertisseurs ADC (*Analog/Digital Converter*). La technique de transmission UWB (*Ultra Wide Band*) est plus appropriée pour les RCMSF par rapport à d'autres technologies, comme le Zigbee, en raison de sa faible consommation d'énergie dans les communications à haut débit.

1.5.2 Plans de gestion

La conception des protocoles dans les réseaux classiques est basée principalement sur la pile protocolaire traditionnelle où chaque couche de la pile est conçue pour fonctionner séparément l'une de l'autre. Les interfaces entre les couches sont statiques et insuffisante en termes d'optimalité et de flexibilité, ce qui ne s'adapte pas avec la limitation des ressources des capteurs multimédia.

C'est pourquoi une nouvelle vision s'impose, celle du "*Cross-layer design*", qui peut être vu comme un moyen d'assouplir les limites de la pile traditionnelle. Son objectif est d'être flexible et efficace pour la mise en œuvre des protocoles de communication.

L'idée consiste à rompre le modèle monolithique en plusieurs plans associés et hiérarchiques, où il n'y a pas de frontières strictes entre les différentes couches. Les messages de contrôle échangés comportent des informations de statut sur chaque couche, de sorte que le système tire profit de cette indépendance.

Les plans de gestion de tâches, de mobilité et d'énergie permettent ainsi aux capteurs de se coordonner et de réaliser leurs missions en étroite collaboration. Cette synergie entre les plans permet d'acheminer les données recueillies et partager les ressources en utilisant efficacement l'énergie disponible, ce qui prolonge positivement la durée de vie du réseau.

- **Plan de gestion d'énergie** : contrôle l'utilisation de la batterie. Après la réception d'un message, le capteur éteint son récepteur afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. En outre, si le niveau d'énergie devient bas, le capteur diffuse à ses voisins une alerte les informant qu'il ne peut pas participer au routage et par conséquent, l'énergie restante est réservée au captage;

- **Plan de gestion de mobilité :** détecte et enregistre le mouvement du capteur. Ainsi, un retour arrière vers l'utilisateur est toujours maintenu et le capteur peut garder la trace de ses voisins et peut balancer l'utilisation de son énergie et la réalisation de tâche;
- **Plan de gestion de tâches :** balance et ordonnance les différentes tâches de collecte de données dans une région spécifique. Il n'est pas nécessaire que tous les capteurs d'une région effectuent le captage au même temps. En revanche, certains d'entre eux exécutent cette tâche plus que d'autres selon leur niveau de batterie.

1.6 Facteurs influençant la conception des RCMSF

Les RCMSF constituent un domaine de recherche multidisciplinaire (informatique embarquée, télécommunication, traitement du signal/image), qui permet aux systèmes distribués, constitués d'équipements embarqués et hétérogènes, de capter, d'interagir et de contrôler l'environnement physique. La conception de tels systèmes complexes est soumise à plusieurs facteurs, à savoir :

- **Le passage à l'échelle :** cette propriété concerne tout type de réseau de capteur sans fil, où les capteurs peuvent être déployés en centaines voire des milliers, dans une zone d'intérêt pour accomplir une mission bien déterminée telle que la surveillance des frontières. Ce nombre peut augmenter après le déploiement pour étendre davantage la région surveillée et par conséquent, les schémas conceptuels des solutions apportées doivent répondre à la nature dynamique et évolutive de ce type de réseau. Les algorithmes et les mécanismes développés pour les RCMSF doivent ainsi fonctionner correctement et indépendamment de la taille du réseau. Dans ce contexte, le routage géographique permet le passage à l'échelle et garantit une progression positive des paquets.
- **La tolérance aux pannes :** les capteurs sont susceptibles de tomber en panne pour diverses raisons : décharge énergétique, défaillance matérielle, écrasement ou vol,...etc. Ces pannes ne doivent en aucun cas causer une baisse de performance ou entraver le bon fonctionnement du réseau, notamment pour les applications critiques ou/et gourmandes en énergie, afin d'assurer la fiabilité des données transmises et un certain niveau de QoE. La tolérance aux pannes est donc la capacité de garder le réseau stable et sans interruption, et ce en dépit des nombreuses pannes qui peuvent survenir à l'un de ses composants.
- **La consommation d'énergie :** la consommation énergétique est une préoccupation fondamentale dans les RCMSF plus que dans les RCSF traditionnels. En effet, les applica-

tions multimédia véhiculent une masse importante de données qui nécessitent des taux de transmission élevés et un traitement intensif. Par conséquent, les algorithmes proposés et les architectures employées doivent tenir compte de cette métrique afin de prolonger la durée de vie du réseau et assurer les exigences de la QoS requises par les applications multimédia.

- **La bande passante élevée :** le contenu multimédia, en général et les flux vidéo en particulier, nécessitent une bande passante de transmission plus élevée que celle supportée par les capteurs classiques. En outre, les techniques de transmission sur plusieurs chemins avec un taux de délivrance élevé et une faible consommation d'énergie doivent être mises au point.
- **Les techniques de codages :** les flux vidéo non compressés nécessitent une bande passante excessive pour un environnement sans fil multi-saut. Les techniques de codages utilisées dans les RCSF classiques ne sont pas adéquates au contenu multimédia. En effet, elles entraînent une lourdeur de traitement et une consommation énergétique plus élevée. En revanche, des techniques de codage et de compression dédiée au contenu multimédia doivent être adoptées en utilisant des algorithmes légers et efficaces.
- **L'architecture flexible :** les architectures des RCMSF supportent plusieurs applications hétérogènes et indépendantes. L'une des caractéristiques essentielle réside dans le fait qu'ils sont sans infrastructure fixe et avec une topologie changeante, due à la mobilité des nœuds, à leur disparition suite à l'épuisement de leurs batteries ou encore à leur apparition pour compenser l'extinction de certains. A cet effet, nous distinguons quatre phases : le pré-déploiement, le déploiement, le post-déploiement et le redéploiement. Cependant, il est nécessaire de développer des architectures flexibles et hiérarchiques pouvant répondre aux exigences requises au sein de la même infrastructure.
- **Le traitement du contenu multimédia :** dans les RCMSF, les algorithmes de traitement du contenu multimédia sur les données brutes ou extraites de l'environnement, permettent de réduire la transmission de l'information redondante en fusionnant les données provenant de plusieurs capteurs avec des résolutions différentes. Ceci requiert un traitement réparti et collaboratif entre les capteurs pour permettre le passage à l'échelle.
- **Le déploiement de capteurs directionnels :** la propriété directionnelle des capteurs multimédias qui exige au préalable un placement efficace, permet d'avoir une précision de détection et une couverture optimale de la zone d'intérêt. Cette propriété rend les capteurs sensibles à la direction de l'acquisition de données. A titre d'exemple, les caméras avec leurs ouvertures et angles de détection, récoltent les informations dans des régions

bien ciblées, en présence d'une ligne de vision sans obstacle entre l'évènement et le capteur, à l'inverse des capteurs classiques, où l'information est recueillie dans une large zone de détection prédéfinie.

- **La gestion d'interférence** : pour supporter le transfert du grand flux multimédia et préserver l'énergie, la transmission des données basée sur le multi-chemin est au centre de toutes approches dans les RCMSF. Néanmoins, ce mode de transmission génère des interférences entre les chemins adjacents ou lors des envois multiples provenant de plusieurs sources. En effet, ces interférences causent les collisions de paquets de données et réduisent ainsi le taux de délivrance qui se traduit par le niveau de fiabilité du réseau.

1.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté en premier lieu, l'anatomie et les caractéristiques du capteur multimédia, étant l'élément de base dans le réseau. Par la suite, nous nous sommes intéressés aux différents aspects qui concernent ce nouveau type de réseau : description, principales caractéristiques, architecture et domaines d'applications. De plus, la qualité de service a été cernée, du fait qu'elle représente un grand défi quant à la garantie d'un certain niveau de service.

Les RCMSF nécessitent la prise en compte de certaines métriques de QoS dans plusieurs couches de la pile protocolaire. C'est pourquoi, le modèle de communication a été décrit où nous avons clarifié le rôle de chaque couche et présenté un modèle *cross-layer* défini par les plans de gestion afin de remédier aux contraintes d'efficacité et de flexibilités.

Par ailleurs, les volets consommation énergétique, tolérance aux pannes et gestion d'interférences ont été évoqués dans les facteurs influençant la conception, comme étant des paramètres incontournables pour la prévention et le maintien du bon fonctionnement du réseau afin de garantir les exigences de la QoS et la transmission des flux multimédia.

Dans le prochain chapitre, nous proposons une classification des protocoles de routage dédiés aux RCMSF, pour en extraire les inconvénients et les avantages, avant de présenter les principales caractéristiques d'un bon protocole de routage.

Première partie

Le routage dans les Réseaux de Capteurs Multimédia Sans Fil (RCMSF)

Chapitre 2

Etat de l'art des protocoles de routage

Sommaire

2.1 Introduction	26
2.2 Classification des protocoles de routage dans les RCMSF	26
2.2.1 Topologie du réseau	27
2.2.2 Modèle de communication	28
2.2.3 Exigences de la QoS	29
2.2.4 Modèle de diffusion de données	31
2.2.5 Paradigme de communication	31
2.2.6 Opération du protocole	32
2.2.7 Type de multimédia	33
2.2.8 Efficacité énergétique	33
2.2.9 Gestion de la congestion	34
2.3 Une bonne solution de routage	36
2.4 Routage géographique	36
2.5 Transmission multi-chemins	38
2.5.1 Découverte de chemins	38
2.5.2 Sélection de chemins et la répartition du trafic	39
2.5.3 Maintenance des chemins	40
2.6 Conclusion	41

2.1 Introduction

Les données collectées par les nœuds sources sont envoyées aux sinks du réseau en vue d'extraire les informations utiles. Cette tâche est confiée au protocole de routage implémenté au niveau de la couche réseau, qui se charge d'acheminer le trafic de bout-en-bout, en utilisant une stratégie de sauts multiples.

En raison des caractéristiques intrinsèques du contenu multimédia (image, son et vidéo), le transfert des paquets de données entre les paires (source-sink) demeure une tâche importante dans la conception et le développement des protocoles de routage dans les RCMSF.

En plus des contraintes héritées des réseaux de capteurs classiques en termes d'énergie, de capacité de traitement et de stockage, les protocoles de routage dédiés aux RCMSF se heurtent à plusieurs défis, notamment la garantie des QoS/QoE exigées par la nature du flux multimédia. Compte tenu des manques de fiabilité des communications radio et les pertes de connexion sans fil (épuiement de batterie, pannes diverses..etc). Ajoutant à cela, les techniques de codage complexes utilisées et les grandes quantités de données transmises, plusieurs stratégies et approches ont été proposées en fonction du type d'application pour surmonter ces contraintes et améliorer les performances à travers la couche réseau de la pile protocolaire [7] .

Dans ce chapitre, nous dressons une classification des protocoles de routages existants trouvés dans la littérature, en s'appuyant essentiellement sur le principe de conception et le mode de fonctionnement. Le but étant de ressortir les avantages et les inconvénients, pour dégager les principales caractéristiques d'un bon protocole de routage. Nous présentons, par la suite le routage géographique et ses différentes stratégies d'acheminement de paquets ainsi que la transmission sur plusieurs chemins.

2.2 Classification des protocoles de routage dans les RCMSF

Le large éventail d'applications dans les RCMSF utilisant un nombre important de capteurs, rend la topologie du réseau plus complexe. En effet, la méthode de recherche des routes pour l'acheminement des données depuis les nœuds sources vers les sinks, divise les protocoles de routage en trois catégories : proactifs, réactifs et hybrides.

Dans les protocoles proactifs, les routes sont établies à l'avance en se basant sur l'échange périodique des tables de routage. Le principal inconvénient de cette méthode est l'échange régulier de messages de contrôle pour le maintien des chemins trouvés. Tandis que dans l'approche réactive, les chemins sont construits à la demande en inondant le réseau par les requêtes de découverte. Les points faibles de cette technique résident dans la consommation

élevée d'énergie due à la surcharge du réseau par les messages de contrôle et les latences enregistrées lors des opérations répétitives de découvertes de routes et de mises à jour, particulièrement en cas de changement de topologie. Les protocoles hybrides combinent les deux approches, le routage est initialement établi avec certaines routes prospectées de manière proactive, puis répond à la demande des nœuds activés en plus par l'inondation réactive.

Pour une topologie statique, l'approche proactive est la plus utilisée en raison des tables de routages préalablement implémentées. En effet, cette méthode permet d'avoir des routes avec disponibilité immédiate, ce qui réduit la consommation énergétique. En revanche, le mode réactif est le mieux adapté dans les topologies changeantes ou mobiles.

Plusieurs protocoles de routage qui ont été proposés dans les réseaux de capteurs conventionnels ne conviennent pas au RCMSF en raison des nouvelles caractéristiques et contraintes imposées par la nature du contenu multimédia déployant des capteurs hétérogènes. Cela impose des défis supplémentaires et nécessite des compromis entre l'efficacité énergétique et la QoS/QoE exigées. A titre d'exemple, les schémas d'agrégation et de compression de données sont largement utilisés pour économiser l'énergie. En revanche, ils peuvent causer des retards inacceptables relatifs aux traitements. Ces contraintes et défis, associés à la limitation de la bande passante et à la nature des applications sensibles aux retards, font du routage dans de tels réseaux une tâche très difficile. Cependant, comme le routage est étroitement lié à l'application envisagée, certains protocoles ont été conçus en fonction des demandes spécifiques.

Notre lecture des solutions de routage trouvées dans la littérature met en évidence les principales classes des figures 2.1 et 2.2. Cette classification non exhaustive repose essentiellement sur le principe de fonctionnement et le mode opératoire des protocoles. De plus, les protocoles peuvent appartenir à plusieurs classes simultanément, ce qui prouve que les classes sortantes ne sont pas totalement disjointes et peuvent être complémentaires.

2.2.1 Topologie du réseau

Dans cette classe, la topologie détermine l'organisation des capteurs dans le réseau et elle est divisée en deux sous-classes :

- **Topologie plate** : tous les nœuds ont la même fonctionnalité et sont similaires en termes de ressources. Ils travaillent ensemble pour atteindre un objectif spécifique.
- **Topologie hiérarchique** : les nœuds sont divisés en plusieurs niveaux de responsabilité et appartiennent à des groupes (*clusters*). Les *clusters* ont des rôles différents dans le réseau et sont constitués d'une tête de cluster (CH) et de ses membres. Le grand avantage de cette architecture, est qu'elle permet l'évolutivité du réseau et réduit la densité du trafic

en agrégeant les données aux CH.

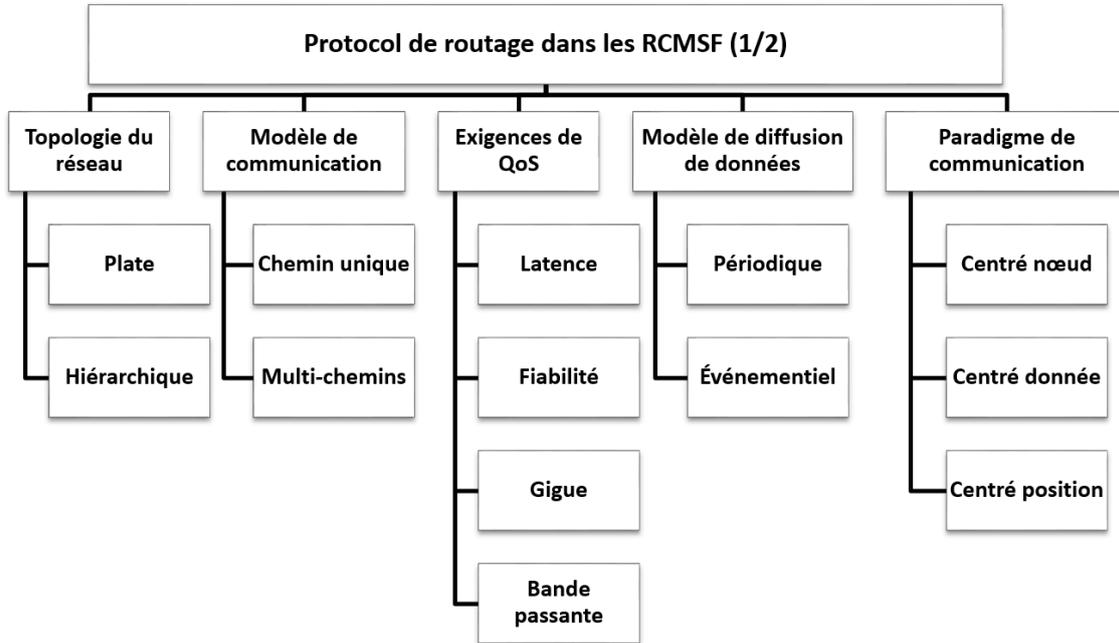


FIGURE 2.1 – Classification des protocoles de routages dans les RCMSF

2.2.2 Modèle de communication

- **Chemin unique** : les protocoles de cette sous-classe utilisent un seul chemin de routage entre la source et la destination pour la transmission des données. Cette méthode est fortement déconseillée pour le transfert du contenu multimédia, en raison de la surexploitation de certains capteurs et également suite aux différentes pannes et défaillances qui peuvent survenir. Cela a pour conséquence, une baisse de performances du réseau ainsi que sa durée de vie.
- **Multi-chemins** : dans cette approche, plusieurs chemins dans la mesure du possible, sont construits entre les sources et les sinks afin d'améliorer les performances du système. En effet, la répartition du flux sur plusieurs chemins, maintient le débit d'envoi et permet d'atteindre un niveau élevé de taux de réussite. Cette approche permet également d'assurer un bon équilibre de charge dans le réseau, ce qui prolonge sa durée de vie et réduit d'une manière importante les délais de bout-en-bout. Le Multi-chemins est nettement recommandé pour les flux multimédias parce qu'il répond aux exigences de la QoS demandées par la couche application et réduit la congestion dans le réseau. Un état de l'art du routage multi-chemins qui prend en compte les paramètres de la QoS pour la transmission de flux multimédia est donné dans [8].

2.2.3 Exigences de la QoS

Contrairement aux RCSF traditionnels qui visent à maximiser la durée de vie du réseau en diminuant la consommation d'énergie, l'objectif principal des RCMSF est d'optimiser la livraison du contenu avec des niveaux de QoS/QoE prédéterminés en termes de délai, fiabilité, énergie, couverture, qualité et bande passante. Ces paramètres doivent être soigneusement pris en compte individuellement ou d'une manière combinée. Dans ce contexte, certains protocoles prennent en charge une seule mesure et d'autres utilisent simultanément deux, trois ou plusieurs mesures à la fois [9].

- **Latence** : il s'agit du temps nécessaire pour acheminer un paquet de données de la source jusqu'à la destination. Egalement appelé temps de réponse ou délai, cette durée dépend du temps passé dans les files d'attente et le médium. Certaines applications sont plus exigeantes et limitées en délai où l'événement doit être signalé dans un délai précis, comme le suivi des intrus, la surveillance des incendies. La ponctualité peut être fournie de manière garantie ou selon le niveau de tolérance requis. De plus, le délai de bout-en-bout peut être catégorisée en deux catégories : déterministe (latence forte) et prédictive (latence douce). Dans les systèmes à latence stricte, un service qui ne peut être fourni dans les délais est considéré comme une panne du système entier, alors que dans les systèmes de latence tolérée, une garantie probabiliste est seulement requise (un certain retard d'une partie du trafic peut être toléré).
- **Fiabilité** : également appelée taux de perte, elle est définie comme la capacité à transmettre les paquets de données de la source vers la destination avec une perte minimale. En fonction du contenu détecté, un certain niveau de fiabilité est imposé. En effet, dans les applications de surveillance des incendies de forêt, les informations de température sur les régions qui ont des températures normales peuvent supporter un certain pourcentage de perte. En revanche, les données contenant des informations sur les régions qui ont des températures plus élevées que la normale doivent être fournies avec une importante probabilité de succès, du fait que cela peut être un signe d'incendie. Etant donné que le manque de fiabilité de la liaison sans fil est en grande partie dû aux interférences et aux congestions, le paramètre de fiabilité est inversement proportionnel au taux de perte de paquets de données. Certaines applications nécessitent des garanties en termes de rapidité et de fiabilité en même temps. A titre d'exemple, la surveillance d'une éruption volcanique ou la détection de gaz toxiques, une livraison rapide et fiable est requise et par conséquent, les protocoles de routage appropriés doivent être soigneusement conçus pour répondre à cette exigence.

- **Gigue** : représente la variation du temps de réponse entre les différents paquets reçus. Généralement dans le trafic multimédia en temps réel, chaque paquet a une exigence de gigue attendue. A cet effet, les applications vidéo à la demande sont souvent exigeantes en termes de gigue pour limiter les distorsions lors de l'écoute ou de la visualisation. Un niveau faible de la gigue dans la transmission peut entraîner des difficultés, des discontinuités et mêmes des erreurs qui ne sont pas acceptables dans certaines applications. Une façon de gérer la gigue consiste à mettre en mémoire tampon d'une façon décalée les flux de données avant les présentations.
- **Bande passante** : également appelée débit, elle définit le volume maximal d'informations que le réseau est capable de transmettre pendant un certain temps. La bande passante disponible sur un chemin dépend du support de liaisons, du nombre de nœuds et de la nature du flux qui partage ces liaisons. La nature du contenu multimédia telle que la voix et la vidéo, nécessitent une bande passante élevée, en raison de la grande quantité d'informations véhiculées. En plus de transmettre leurs propres données, les nœuds fonctionnent comme des relais due au paradigme intrinsèque de la communication multi-saut à faible portée. A titre d'exemple, la vidéoconférence en utilisant un seul chemin épuise les batteries des nœuds capteurs constituant le chemin et provoque une défaillance précoce dans le réseau. Pour résoudre un tel problème, la bande passante disponible doit être exploitée en utilisant à la fois des trajets multiples et des canaux multiples de manière superposée. En d'autres termes, les demandes en bande passante élevées doivent être prises en compte lors de la conception des protocoles de routage dans les RCMSE.

TABLEAU 2.1 – Différents niveaux d'exigence de QoS

Application	Fiabilité	Latence	Gigue	Débit
Courrier électronique	Haute	Faible	Faible	Faible
Transfert de fichier	Haute	Faible	Faible	Moyenne
Accès au Web	Haute	Moyenne	Faible	Moyenne
Session à distance	Haute	Moyenne	Moyenne	Faible
Audio à la demande	Faible	Faible	Haute	Moyenne
Vidéo à la demande	Faible	Faible	Haute	Haute
Téléphonie	Faible	Haute	Haute	Faible
Vidéoconférence	Faible	Haute	Haute	Haute

Cependant, les exigences en QoS dépendent fortement de l'application attendue. A cet ef-

fet, le tableau comparatif 2.1 est fourni à titre indicatif où plusieurs types d'applications avec des différents niveaux d'exigences pour chaque métrique sont présentés.

En plus des métriques citées ci-dessus, l'énergie représente une forte contrainte de QoS dans les RCMSE. Par ailleurs, les communications entre les nœuds capteurs sont faites sur le canal radio, cependant, la qualité du lien sans fil reste peu fiable et susceptible à des variations dû à l'état du réseau et à sa topologie changeante.

2.2.4 Modèle de diffusion de données

la méthode de détection de données dépend de l'application prévue et de l'importance des données recueillies et peut être catégorisée en : périodique (par requête) et événementiel. Dans les applications périodiques (time-driven), le prélèvement des données se fait d'une façon régulière dans le temps ou par requête. En effet, cela est utile dans des applications de monitoring (feu, météo) afin d'établir des rapports périodiques. Par contre, dans les modèles pilotés par événement (event-driven), la transmission des données est déclenchée immédiatement lorsqu'un événement et/ou changement soudain se produit. Pour cela, le protocole doit être réactif et donne des réponses rapides à l'occurrence d'un certain nombre d'évènements.

2.2.5 Paradigme de communication

Il existe trois paradigmes de communication, à savoir :

- **Centré nœud** : dans ce paradigme la communication se base sur l'identification des nœuds participants, en utilisant l'adresses IP.
- **Centré donnée** : dans ce type, la donnée est plus importante que le nœud lui-même, ce qui rend son identification inutile. Les communicateurs sont identifiés par leurs données et par conséquent, le système peut être vu comme une base de données distribuée.
- **Centré position** : le routage s'effectue grâce aux positions de nœuds (coordonnées géographiques) afin d'acheminer l'information d'une zone vers une autre. Ce paradigme de communication est également appelé routage géographique où l'emplacement des nœuds peut être obtenu sur la base de la valeur du RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) d'un paquet reçu ou en utilisant un GPS (*Global Positioning System*). Les grands avantages de ce type d'architecture sont l'évolutivité et la convergence rapide. Deux catégories dérivent de cette classe : le routage hors ligne (*Offline*) qui se fait en deux étapes, la construction de chemins puis l'envoi de données. Tandis que le routage en ligne (*Online*) se produit au fur et à mesure de la création de chemins.

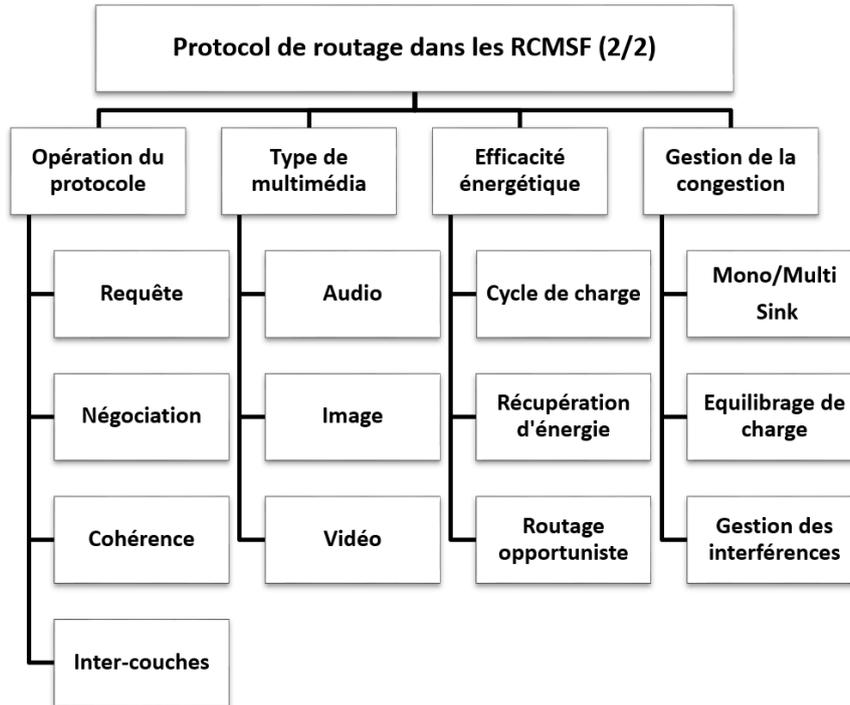


FIGURE 2.2 – Suite de la classification des protocoles de routages dans les RCMSF

2.2.6 Opération du protocole

- **Routing basé sur la requête** : dans ce type de réseaux, le fonctionnement du protocole est basé sur les requêtes de demande et de réponse des nœuds capteurs. En effet, le sink envoie une requête exprimée dans des langages de requêtes naturelles à des nœuds ciblés ou dans tout l'ensemble du réseau afin d'avoir certaines informations sur l'environnement à surveiller. Les nœuds qui ont cette information répondent en envoyant les données correspondantes.
- **Routing basé sur la négociation** : lorsqu'un événement se produit dans une zone de couverture, les nœuds proches de celui-ci le capturent et transmettent par conséquent les mêmes informations. Ces nœuds voisins inondent le réseau par des données redondantes qui génèrent une consommation d'énergie élevée. Le principe de ce type de routing se base sur la négociation entre les nœuds capteurs en échangeant des paquets spéciaux de signalisation, appelés méta-données, avant toute transmission de données. Les messages meta-data permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent des mêmes données à transmettre. A la fin des négociations les décisions de communication sont prises en fonction des ressources disponibles. Cette procédure élimine le problème de redondance des données et ne transmet que les informations utiles.
- **Routing basé sur la cohérence** : les nœuds capteurs coopèrent entre eux et traitent les

données brutes avant de les envoyer aux nœuds d'agrégation en utilisant des techniques de traitement de données. En revanche, dans le routage basé sur la non-cohérence, les données sont envoyées aux agrégateurs sans aucun traitement préalable.

- **Routage basé sur le design inter-couches** : les différents paramètres de QoS à garantir par chaque couche de la pile de communication dans la transmission des flux multimédia, en plus de l'interdépendance qui existe entre ces couches (passage de paramètres et métriques), ont conduit les concepteurs à proposer l'approche cross-layer (décrite dans la section 1.5.2), dont l'objectif est d'optimiser les performances du routage et d'assurer une garantie de livraison avec la moindre consommation de ressources.

2.2.7 Type de multimédia

De nombreuses nouvelles techniques de routage ont été spécialement conçues pour le contrôle, la transmission et la gestion des données multimédia volumineuses. Les applications dans les RCMSF gèrent des données hétérogènes qui peuvent être composées de données scalaires, audio, image et vidéo, avec des exigences de QoS variées. En raison du trafic hétérogène et ses différentes exigences, la fourniture de la différenciation des services devient cruciale pour satisfaire les paramètres de QoS dans les RCMSF. Certains protocoles introduisent plusieurs files d'attente pour différents types de paquets et les affectent avec des priorités différentes. En effet, le voisin ayant une énergie résiduelle plus élevée, une qualité de liaison supérieure et une charge inférieure sera choisi pour l'acheminement. De plus, les besoins de transmission en termes de bande passante peuvent être supérieurs à la capacité maximale de transmission des capteurs. A titre d'exemple, le streaming vidéo en temps réel nécessite une bande passante élevée et généralement une soft latence comme mentionné dans le tableau 2.1. En revanche, le transfert de fichiers nécessite un taux de succès élevé, une faible latence avec un débit moyen.

2.2.8 Efficacité énergétique

- **Cycle de charge (Duty-Cycle)** : certains protocoles suppose que les capteurs sont toujours actifs, lors du fonctionnement, alors que dans la réalité les capteurs dans les RCMSF à faible coefficient d'utilisation s'alternent continuellement sur deux états Actif et Sommeil (Duty-Cycled). Ils sont actifs lors des opérations de captages, de traitement ou de transmission et restent dormants dans le reste du temps afin de réduire la consommation d'énergie. Néanmoins, la communication dans de tels réseaux enregistre un faible retard qui reste négligeable dans les délais de transmission de bout-en-bout [10].
- **Récupération d'énergie** : les progrès récents dans les domaines de la collecte d'énergie

solaire, la piézoélectrique et la thermique ont permis de récupérer l'énergie et prolonger ainsi la durée de vie du réseau [11].

- **Routing opportuniste** : assurer la fiabilité des données transmises en se basant sur les retransmissions génère plus de dépenses énergétiques. La technique du routage opportuniste est capable de tirer parti de la diversité et des fonctionnalités de diffusion de la liaison sans fil pour combiner plusieurs liens non fiables en un seul lien fiable. Dans ce contexte, les protocoles de routages opportunistes basés sur le contrôle de la puissance de transmission, permettent d'économiser l'énergie en réduisant la puissance d'émission, compte tenu du coût énergétique relatif à la réception des paquets par les voisins. Cette approche assure un certain niveau de fiabilité, mais ne prend pas compte du délai de livraison.

2.2.9 Gestion de la congestion

La congestion est l'un des principaux problèmes affectant les performances des RCMSF en termes d'utilisation d'énergie, de fiabilité et de latence. Les techniques employées visant à prévenir les encombrements, sont classées en trois catégories : routage basé sur les champs potentiels, routage basé sur l'équilibrage de charge et le routage basé sur le multi-chemins prenant en compte les interférences.

- **Routing basé sur le champ potentiel** : un certain nombre de mécanismes de routage utilisent le concept du champ potentiel pour le contrôle de la congestion [12]. En effet, ce principe tiré de la physique, permet des représentations alternatives des champs aux propriétés particulières. Nous distinguons deux principaux types selon les environnements : mono-sink et multi-sinks.
- **Routing basé sur l'équilibrage de charge** : le routage dynamique en temps-réel entraîne une congestion sur des chemins spécifiques. C'est pourquoi, la prise en compte de l'équilibrage de charge permet d'atténuer l'effet de congestion et de minimiser les pertes de paquets.
- **Routing basé sur la gestion des interférences** : le routage par trajets multiples est une solution prometteuse pour améliorer l'utilisation des ressources, réduire la congestion et équilibrer la charge dans le réseau. Néanmoins, cette méthode génère des interférences entre les chemins adjacents lors des transmissions des données provenant d'une/plusieurs sources. En effet, ces interférences causent les collisions de paquets de données et réduisent ainsi le taux de fiabilité.

TABEAU 2.2 – Tableau comparatif des protocoles de routage dédiés aux RCMSF

Protocoles	Architecture	Exigences QoS	Multi-Chemins	Diff.-Service	Contour.-Trous	Inter-Couches	Congestion	Priorité-Trafic	Interférence
MPMP [13]	Plate	Délai-Fiabilité	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
EA-TPGF [14]	Plate	Fiabilité-Energie	✓	-	✓	-	-	-	-
MREEP [15]	Plate	Fiabilité-Energie	✓	-	-	-	✓	✓	-
MHDM [16]	Plate	Fiabilité-Energie	✓	-	-	-	✓	-	-
GEAM [5]	Plate	Fiabilité	✓	-	✓	-	-	-	✓
PASPEED [17]	Plate	Délai-Fiabilité-Energie	-	-	✓	-	-	✓	-
ADRS [18]	Plate	Fiabilité	✓	-	✓	-	-	-	-
SPEA [19]	Plate	Délai-Fiabilité	-	-	-	-	-	-	✓
MAEE [20]	Plate	Fiabilité-Energie	✓	-	✓	-	-	✓	-
EEQAR [21]	Hiérarchique	Mobilité-Energie	✓	-	✓	-	-	-	-
CUDAR [22]	Plate	Délai-Fiabilité	-	-	✓	✓	✓	-	-
AGEM [23]	Plate	Fiabilité-Mobilité-Energie	✓	-	✓	-	-	-	-
QMCC [24]	Plate	Fiabilité	✓	✓	-	-	✓	✓	-
PWDGR [25]	Plate	Fiabilité-Energie	✓	-	-	-	-	-	-
POWQR [26]	Plate	Délai-Fiabilité-Energie	✓	-	-	-	✓	-	-
EEQoS [27]	Plate	Fiabilité-Energie	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
IDDR [28]	Plate	Energie	✓	✓	-	-	✓	-	-
ROL [29]	Hiérarchique	Fiabilité-Energie	-	✓	-	-	✓	-	-
QMOR [30]	Plate	Fiabilité-Energie	✓	-	-	-	-	✓	-
CAQR [31]	Plate	Fiabilité-Energie	-	-	-	-	✓	✓	-
AAEEGF [32]	Plate	Délai	✓	-	✓	-	-	-	-
MEVI [33]	Hiérarchique	Délai-Energie	-	-	-	✓	-	-	-
EEQR [34]	Hiérarchique	Délai	-	✓	-	✓	-	-	-
IAMVD [35]	Plate	Fiabilité	✓	-	-	-	-	✓	✓
QSBP [36]	Plate	Délai-Fiabilité-Energie	✓	✓	-	✓	-	-	-
CBCM [37]	Hiérarchique	Fiabilité-Energie	✓	✓	-	✓	-	✓	-

2.3 Une bonne solution de routage

Notre lecture permet de dégager les principaux critères d'un bon protocole de routage, en essayant de combiner les avantages de chaque classe vue précédemment. A cet effet, de notre point de vue, une bonne solution de routage doit satisfaire les critères suivants :

- Transmission sur multi-chemins pour supporter le grand flux multimédia et réduire ainsi les délais de bout-en-bout;
- Prise en compte des interférences afin de minimiser les collisions;
- Conception d'approches et stratégies permettant la gestion de plusieurs transfert en même temps ainsi que leur chevauchement (multi-sources vers multi-sinks);
- Exploitation de la corrélation qui existe entre les couches de la pile de communication (transport, réseau et MAC) sur la base d'une perception multi-couches afin de minimiser l'utilisation des ressources du réseau et optimiser ses performances;
- Mise en œuvre de techniques et mécanismes appropriés pour gérer efficacement l'énergie résiduelle des nœuds, ce qui assure l'équilibrage de charge et éviter par conséquent les changements de topologie causés par l'épuisement des batteries;
- Satisfaire les exigences de la QoS en termes de délai, fiabilité et bande passante;
- Implémentation de différents mécanismes de tolérance aux pannes pour maintenir la connectivité et la stabilité du réseau;
- Contournement des trous (vides) et obstacles pendant la construction des chemins et également lors la livraison en temps-réel;
- Mise en place d'approches et méthodes pour supporter la différenciation de service, en raison des de l'hétérogénéité des flux transmis. En d'autres termes, affecter plusieurs niveaux de priorités aux paquets et appliquer des stratégies d'ordonnancement en fonction de la qualité des chemins à empruntés.

Avant de présenter notre solution de routage, nous mettons en avant le principe et les avantages du routage géographique, noyau de base de notre conception ainsi que la notion de multi-chemins jugée nécessaire lors de la transmission des flux multimédia volumineux.

2.4 Routage géographique

Le routage géographique considéré comme l'un des paradigmes de routage les plus populaires dans les réseaux de capteurs, possède de bonnes propriétés et offre plusieurs avantages. Notamment en matière de découverte de routes optimales avec la possibilité de transmission

en multi-chemins. De plus, il permet l'évolutivité du réseau (passage à l'échelle) et fonctionne en mode distribué où tous les nœuds exécutent les mêmes algorithmes et peuvent prendre des décisions à chaque étape indépendamment des choix précédents.

Chaque nœud connaît sa position géographique ainsi que celles de ses voisins par l'échange des messages de balisage (*Beacon*) et construit par conséquent sa table de voisinage. Bien que tous les protocoles de routage géographique utilisent les positions géographiques des nœuds capteurs pour le routage des paquets de données, ils diffèrent dans la manière de les exploiter. A cet effet, chaque protocole définit sa propre stratégie d'acheminement relative à la sélection du prochain saut parmi le sous-ensemble des voisins du nœud courant.

Par ailleurs, la plupart des stratégies proposées dans la littérature reposent sur deux techniques : *l'acheminement gourmand* et *le routage de faces*. Le transfert gourmand tente de rapprocher le message à la destination à chaque étape en le transmettant au voisin le plus approprié du point de vue localisation. Ainsi, le voisin le plus convenable est celui qui minimise la distance euclidienne par rapport à la destination dans chaque étape (*Greedy Forwarding*). Alternativement, une autre notion de progrès est considérée, à savoir la distance projetée sur la ligne (source, sink) tels que *MFR (Most Forward progress within Radius)*, *NFP (Nearest with Forward Progress)* et l'angle minimum entre le voisin et la destination (*Compass Routing*).

Nous expliquons les principales stratégies d'acheminement dans l'exemple suivant présenté par la figure 2.3, où la source (S) possède un paquet à transmettre au sink (Sk), et doit donc choisir le nœud de prochain saut parmi ses voisins (A,B,C,D) situant dans sa portée de communication R.

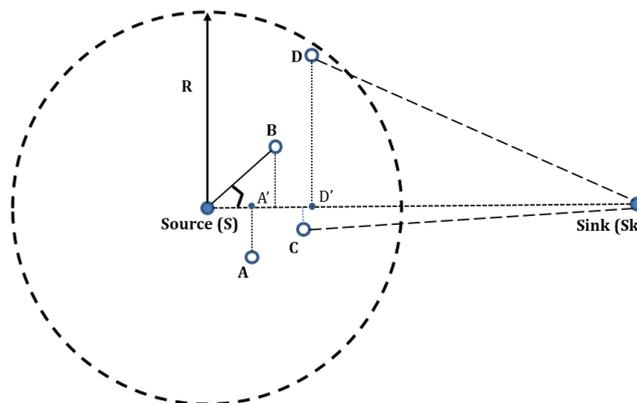


FIGURE 2.3 – Stratégies du routage géographique

- **La progression la plus avancée à l'intérieur du rayon (*Most Forward progress within Radius - MFR*)** : consiste à choisir le voisin qui maximise le progrès vers le sink, autrement dit, qui minimise la distance euclidienne entre la projection orthogonale du voisin

sur la droite (S-Sk) et le sink. Parmi les voisins de la source, D est le nœud de prochain saut, puisque la distance(D',Sk) est la plus courte. D' étant la projection orthogonale de D sur la droite (S-Sk) ;

- **Le plus proche avec la progression de l'expédition (*Nearest with Forward Progress - NFP*)** : la source choisit le voisin qui minimise le progrès vers le sink dans le but de minimiser l'atténuation du signal. Comme illustré dans la figure 2.3, A est le voisin de relais car sa projection A' effectue le progrès minimal vers le sink. La distance(A',Sk) étant la plus courte distance ;
- **Routage de boussole (*Compass Routing*)** : consiste à acheminer le paquet vers le voisin situé dans la direction du sink avec le plus petit angle avec la ligne (S,Sk). Ainsi, la source choisit le voisin B qui a le plus petit angle \widehat{BSSk} ;
- **Expédition gloutonne/gourmande (*Greedy forwarding*)** : vise aussi à maximiser la progression vers le sink mais en considérant la distance au lieu du progrès. Ainsi, la source transmet le paquet au voisin le plus proche au sink en termes de distance euclidienne. La distance(C,Sk) étant la plus courte et par conséquent le nœud C est le prochain saut.

2.5 Transmission multi-chemins

Bien que l'approche de routage par trajets multiples ait été employée à différentes fins, le gain de performance obtenu est fortement affecté par la capacité du protocole à construire un nombre adéquat de chemins de haute qualité [7]. En effet, il existe trois phases principales pour chaque protocole de routage multi-chemins : la découverte de chemins, la sélection de chemins et la distribution du trafic et finalement la maintenance des chemins.

2.5.1 Découverte de chemins

La transmission de données dans les réseaux de capteurs sans fil est effectuée par des techniques d'acheminement de données en multi-sauts. Contrairement au schéma traditionnel de transmission qui se base sur la sélection du plus court chemin, la notion de multi-chemins consiste à construire plusieurs chemins de transmission entre la source et le sink. Généralement les chemins disponibles sont classés en quatre catégories : chemins à nœuds-disjoints, chemins à liens-disjoints, chemins partiellement disjoints et chemins totalement disjoints également appelés chemins à zone disjointe. La densité du réseau et les exigences de performance des applications déterminent le modèle à choisir.

Les chemins à nœuds-disjoints (a) ne partagent aucun nœud ou lien à l'exception de la

paire (source-sink). Par conséquent, toute défaillance d'un nœud ou d'une liaison n'affecte que le chemin qui contient le nœud ou le lien défaillant. Cette particularité est également présente dans les chemins totalement disjoint (d) avec en plus, un écart de distances entre les chemins supérieures de deux fois au minimum à la portée radio. En revanche, les chemins à liens-disjoints (b) peuvent contenir plusieurs nœuds communs alors qu'il n'y a pas de lien partagé entre eux. En conséquence, toute défaillance d'un nœud peut briser l'ensemble de chemins qui le partagent. Enfin, les chemins partiellement disjoints (c) peuvent partager plusieurs nœuds ou liens entre eux.

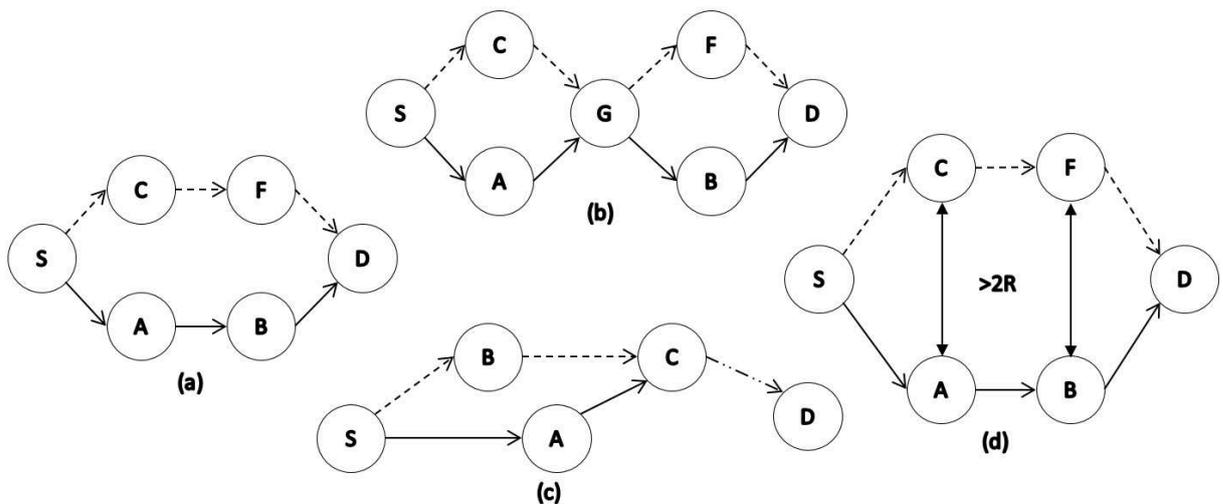


FIGURE 2.4 – Différent type de disjonction de chemins

- (a) Chemins à nœuds-disjoints : Chemin1(S-C-F-D), Chemin2(S-A-B-D) / $Ch1 \cap Ch2 = \{\emptyset\}$
- (b) Chemins à liens-disjoints : Chemin1(S-C-G-F-D), Chemin2(S-A-G-B-D) / $Ch1 \cap Ch2 = \{G\}$
- (c) Chemins partiellement disjoints : Chemin1(S-B-C-D), Chemin2(S-A-C-D) / $Ch1 \cap Ch2 = \{C, \overrightarrow{CD}\}$
- (d) Chemins totalement disjoints : Chemin1(S-C-F-D), Chemin2(S-A-B-D) / $Ch1 \cap Ch2 = \{\emptyset\}$,

$$\forall (n_i \in Ch1, n_j \in Ch2), Distance(n_i, n_j) > 2R.$$

2.5.2 Sélection de chemins et la répartition du trafic

Après la construction de chemins, un autre problème réagit relatif à la répartition du trafic sur les chemins disponibles. En effet, selon la conception et les attentes de chaque protocole de routage, un certain nombre de chemins est attribué à chaque flux pour répondre aux exigences de performance de l'application prévue.

Une première méthode consiste à utiliser le meilleur chemin pour la transmission de données et conserver les chemins supplémentaires comme chemins de secours à des fins de tolérance aux pannes [38]. En revanche, en présence d'un trafic important, un sous ensemble de

chemins est utilisé pour réduire la congestion et maintenir l'équilibrage de charge dans le réseau. Cette approche est généralement adoptée pour attribuer des niveaux de priorité à chaque trafic afin de partager le flux de données (vidéo) en deux flux distincts image et audio [12].

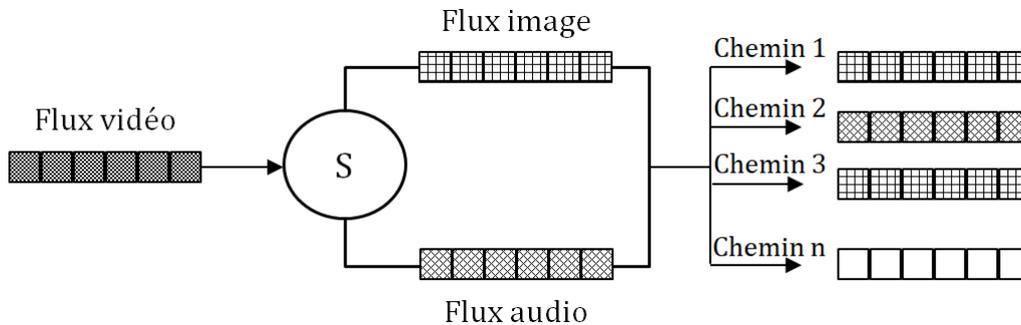


FIGURE 2.5 – Niveaux de priorités pour un flux de données

La dernière méthode se sert de tous les chemins disponibles pour le transfert de données afin de réduire le temps de livraison et augmenter davantage le taux de livraison. Cependant, en raison des interférences entre les nœuds voisins, l'utilisation de tous les chemins construits à un seul canal n'offre pas nécessairement une capacité de transmission supérieure. Néanmoins, la transmission de données à travers quelques chemins peut ne pas utiliser efficacement les ressources sous-jacentes dans les réseaux de capteurs sans fil denses [7].

Une fois que les chemins sélectionnés, le protocole de routage détermine comment distribuer le trafic. A cet effet, plusieurs stratégies peuvent être employées en utilisant divers mécanismes d'allocation de trafic. A titre d'exemple, l'introduction d'un certain degré de redondance dans le processus de livraison pour garantir un niveau de fiabilité où le même flux est envoyé sur plusieurs chemins. De plus, l'utilisation de mécanismes de répartition de charge d'une manière efficace tel mentionné dans la figure 2.5.

2.5.3 Maintenance des chemins

En raison des contraintes de ressources et de la dynamique des liaisons sans fil de faible puissance, les chemins sont fortement sujets aux erreurs. Par conséquent, la reconstruction du chemin doit être fournie pour réduire la dégradation des performances. C'est la tâche principale de la phase de maintenance des chemins dans les protocoles de routage basés sur la transmission multi-chemins.

Dans la littérature, le processus de redécouverte de chemins peut être initié dans trois situations différentes : lorsqu'un chemin actif a échoué, lorsque tous les chemins actifs ont échoué ou lorsqu'un certain nombre de chemins actifs a échoué. En raison de la fréquence élevée de

pannes dans certaines applications, le processus de redécouverte de chemin impose un surcoût considérable.

Néanmoins, l'exécution d'un processus de redécouverte d'itinéraire après la défaillance d'un certain nombre de chemins ou de tous les chemins peut réduire fortement les performances du réseau. A cet effet, il semble plus judicieux de réparer la défaillance dès qu'un chemin actif tombe en panne. Dans cette optique, nous détaillons dans le 5^{ème} chapitre, nos contributions relatives à la maintenance des chemins de transmission, en l'occurrence notre politique de recouvrement instantanée basée sur la prévention et/ou la défaillance d'un nœud ou d'un ensemble de nœuds.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différentes classes des protocoles de routage dédiés aux RCMSF où nous avons dressé un tableau comparatif basé sur multiples critères de performance. La synthèse réalisée nous a permis de tracer les directives essentielles pour en proposer une solution de routage efficace, qui tient compte des spécificités des réseaux (statiques ou dynamique) et répond aux exigences du contenu multimédia, notamment les transmissions multiples simultanées sur plusieurs chemins avec la prise en charge des interférences, l'exploitation de la corrélation inter-couches, la prise en compte des paramètres de la QoS et l'implémentation de techniques et mécanismes adéquats pour tolérer les éventuelles pannes qui peuvent surgir dans le réseau.

Par la suite, nous nous sommes intéressés particulièrement au concept du routage géographique en raison de ses innombrables avantages et à la transmission établie sur multi-chemins en survolant les différents types de disjonction de chemins.

Dans le chapitre suivant, nous présentons notre première contribution relative au protocole de routage géographique multi-chemins destiné aux données discrètes et flux multimédia dans les réseaux de capteurs sans fil. A cet effet, nous détaillons la conception proposée, les messages utilisés et les différentes phases de fonctionnement et nous mettons également l'accent sur la gestion des transmissions multiples en présence de plusieurs paires (source, sink) dans le réseau.

Chapitre 3

Protocole de routage Géographique Multi-Chemins (GM)

Sommaire

3.1 Introduction	43
3.2 Conception	43
3.3 Améliorations apportées au routage géographique glouton	44
3.4 Modèle du réseau et hypothèses de conception	45
3.5 Messages utilisés	46
3.5.1 Message de balisage	47
3.5.2 Message de contrôle	48
3.5.3 Message de données	48
3.6 Phases de fonctionnement	49
3.6.1 Exploration du chemin	49
3.6.2 Optimisation du chemin	51
3.6.3 Transmission de données	52
3.7 Multiple paires (source,sink)	54
3.8 Conclusion	57

3.1 Introduction

Après avoir détaillé les différentes classes de routages apportées aux RCMSF et exposé les principaux critères d'un bon protocole de routage, nous décrivons dans ce chapitre notre première contribution relative au protocole de routage Géographique Multi-chemins (*Geographic Multipath*) baptisé GM [39]. Notre protocole de routage prend en charge les différentes phases de routage en commençant par la découverte des routes jusqu'à l'envoi effectif des données, à l'inverse des protocoles de routage étudiés dans la littérature, qui se focalisent principalement sur la partie découvertes/construction de chemins au détriment de la phase de transmission de données souvent négligée.

GM satisfait les exigences de la transmission multimédia en temps-réel en supportant les fonctionnalités suivantes :

- Transmission sur multi-chemins pour augmenter la bande passante;
- Election des plus courts chemins afin de minimiser les délais de transmission;
- Contournement des trous statiques (vide/obstacle) pendant de la construction de chemins et dynamiques (pannes, mobilité) durant la transmission des données;
- Multi-transmissions simultanées (multi-sources vers multi-sinks);
- Exploitation de l'interdépendance entre les couches (*Cross-layer*).

3.2 Conception

Le protocole de routage géographique multi-chemins développé est de nature économe en énergie et adaptatif au changement (chapitre 5) avec un fonctionnement hybride à contraintes multiples. Il combine les avantages des approches proactives et réactives dans le sens où il construit les chemins de routages dès la détection d'événements d'une manière proactive.

A cet effet, GM construit les routes uniquement lorsqu'un évènement se produit dans le réseau (technique réactive), contrairement à la méthode proactive où les trajets sont calculés avant que le besoin ne se manifeste. Cette démarche réactive lui permet d'économiser l'énergie en réduisant le nombre de messages de balisages envoyés périodiquement (routage proactif), où dans notre conception, nous avons définie deux cycles de ce type de message.

De plus, l'envoi des paquets de données n'est pas réalisé directement après la détection d'une façon réactive. En effet, cette approche consomme plus d'énergie due à l'inondation du réseau par les messages de contrôles, ce qui provoque également une latence considérable lors des opérations de découvertes d'itinéraires .

Pour palier à cette contrainte, nous avons procédé à la construction des chemins d'une manière proactive après la détection. Cela permet d'établir les routes optimales vue que la transmission s'effectue sur plusieurs chemins en se basant sur une fonction objective multi-critères.

En cas de pannes ou de mobilité, il bascule entre les chemins de routages sans interrompre la continuité de livraison et construit parallèlement les routes alternatives afin d'assurer la fiabilité des données transmises tout en minimisant les paquets de contrôle inutiles.

3.3 Améliorations apportées au routage géographique glouton

Nous nous sommes basés dans notre conception pour l'acheminement de paquets sur le routage géographique de type glouton (*GreedyForwarding*) en raison de sa simplicité et efficacité quand à la construction de chemins optimaux. Cependant, ce type de routage souffre en cas de faible densité par l'absence de voisins avec une progression positive vers le sink. En d'autres termes, quand le nœud courant n'a pas de voisin plus proche du sink que lui-même, telle que illustré dans la figure 3.1, où le nœud j n'a pas de voisins dans sa zone de progrès positif (*Positive Progress Area*) (le grand demi-cercle en pointillés) vers le sink. Par conséquent, le protocole ne peut plus faire avancer le paquet en utilisant le routage glouton basique. Cette contrainte et faiblesse est connue sous le nom de "*Minimum Local*".

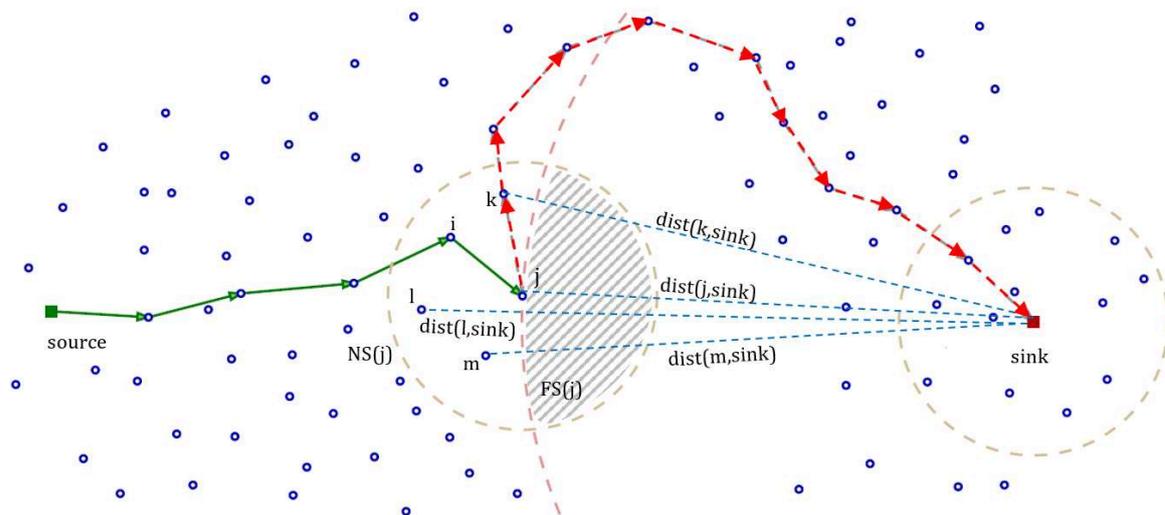


FIGURE 3.1 – Problème du minimum local dans le routage géographique glouton

Dans notre approche, le nœud j établit l'ensemble de relais (*ForwardingSet*) schématisé dans l'exemple de la figure 3.1 par la zone hachurée. Le $FS(j)$ est donc un sous-ensemble de l'ensemble des nœuds voisins (*NeighborSet*) de j qui contient les nœuds les plus proches du

sink que le nœud j . Formellement, $FS(j) = \{ x \in NS(j) / \text{dist}(j, \text{sink}) - \text{dist}(x, \text{sink}) \geq 0 \}$.

Notre première amélioration apportée au routage glouton basique réside dans le fait où le nœud courant se permet de sélectionner un voisin avec une distance euclidienne par rapport au sink plus grande de la sienne par rapport au sink. Cette vision nous permet d'avoir des progressions vers le sink en présence de vide, trou, obstacle et même dans le cas de changement de topologie (pannes, mobilité).

Dans l'exemple de la figure 3.1, le nœud j n'a pas de voisins dans sa zone de progrès positif avec des distances inférieure à sa distance par rapport au sink et par conséquent, le $FS(j) = \{\emptyset\}$. Cependant, il sélectionne désormais le nœud de prochain saut parmi ses voisins dans son *NeighborSet* (NS) qui contient les nœuds (l, i, m, k) malgré que leurs distances par rapport au sink sont plus grande que celle de j par rapport au sink. Le i étant son prédécesseur, le nœud j choisi parmi (l, m, k) celui qui minimise la contrainte du *ForwardingSet*. En d'autres termes, celui qui a la distance la plus petite par rapport au sink :

$$\text{Min} \left[\text{dist}(j - \text{sink}) - \begin{pmatrix} \text{dist}(l - \text{sink}) \\ \text{dist}(k - \text{sink}) \\ \text{dist}(m - \text{sink}) \end{pmatrix} \right]$$

En effet, $\text{dist}(k, \text{sink}) < \text{dist}(m, \text{sink}) < \text{dist}(l, \text{sink})$ et par conséquent, le nœud k est sélectionné comme prochain saut. Ce dernier exploite de la même façon le chemin de routage jusqu'à atteindre le sink comme indiqué par la continuité du chemin en pointillés rouges.

Nous constatons que le chemin de routage construit n'est pas optimal, c'est pourquoi notre deuxième amélioration apportée au routage glouton basique consiste à optimiser les chemins construits et sera détaillé davantage dans la section 3.6.2 du présent chapitre.

3.4 Modèle du réseau et hypothèses de conception

Dans notre conception, nous supposons que l'architecture est plate et considérons le réseau comme un graphe $G = (N, L)$ où $N = \{n_1, \dots, n_p\}$ représente l'ensemble fini de nœuds et $L = \{l_1, \dots, l_q\}$ l'ensemble fini de liens.

Les N nœuds capteurs sont déployés de manière statique déterministe et chaque nœud capteur connaît sa localisation géographique et celles de ses voisins à un saut ainsi que les positions des sinks.

Tous les nœuds sont homogènes et dotés des mêmes capacités physiques de détection et de communication. Ils ont également la même la portée de transmission et disposent d'une seule interface radio multicanaux et par conséquent, à un temps donné, ils peuvent soit transmettre

ou recevoir les données sur un seul canal.

Les liens de communications sont bidirectionnelles et la relation de voisinage est symétrique (si A se trouve dans la table de voisinage de B , B figure également dans la table de A).

Notons par $N_{source} = \{n_{s_1}, \dots, n_{s_n}\}$ l'ensemble des nœuds sources et $N_{sink} = \{n_{sk_1}, \dots, n_{sk_m}\}$ l'ensemble des nœuds sinks.

Chaque chemin est composé d'un ensemble fini de nœuds et est noté dans G par $Ch_{(s,sk)}(t) = \{s, a_{ch}, b_{ch}, \dots, sk\}$ s'il relie un nœud source $s \in N_{source}$ au sink $sk \in N_{sink}$ avec au moins un nœud intermédiaire. Dans l'exemple a_{ch} et b_{ch} sont les deux nœuds intermédiaires a et b qui appartiennent à l'instant t au chemin ch . $N_{chemins} = \{ch_1, \dots, ch_n\}$ définit l'ensemble des chemins de routage entre les paires (sources, sinks)

Chaque nœud appartient à un seul chemin, à l'exception des sources et des sinks, étant donné que les chemins construits sont à nœuds disjoints (ne partagent aucun nœud commun) et chaque nœud peut être dans l'un des états suivants :

- Valide : prêt à construire un chemin;
- Actif : déjà utilisé dans un chemin (verrouillé pour un chemin spécifique);
- Bloqué : pas de prochain saut valide excepté son prédécesseur;
- Défaillant : endommagé, en panne;
- Vulnérable : énergie résiduelle faible.

Désignons par $N_{trou-statique} = \{n_{ts_1}, \dots, n_{ts_m}\}$ le sous-ensemble de nœuds défaillants avant la construction des chemins et comme chaque lien peut être soit disponible ou indisponible, le $L_{trou} = \{l_{t_1}, \dots, l_{t_u}\}$ désigne l'ensemble des liens indisponible.

Nous définissons par $N_{trou-dynamique} = \{n_{td_1}, \dots, n_{td_n}\}$ l'ensemble des chemins ($N_{chemins}$) et l'ensemble des nœuds défectueux pendant la transmission des données en temps réel.

Il en résulte les nœuds disponibles $N_{disponible} = N - N_{trou-statique} - N_{trou-dynamique}$ et les liens disponibles $L_{disponible} = L - L_{trou}$.

La fonction de coût de lien notée $f(x_k)$ est utilisée par le nœud x pour sélectionner le meilleur k de prochain saut valide.

3.5 Messages utilisés

Dans notre conception, nous avons utilisé trois types de messages pour le bon déroulement des différentes phases de fonctionnement, à savoir : message de balisage, message de contrôle lors de la construction des chemins et message de données pour le transférer du trafic. Dans ce qui suit, nous détaillons le format de chaque message spécifiant uniquement la partie de

charge utile, sans s'étaler sur la partie entête qui contient les champs communs à tous les messages, telles que les adresses de la source et du sink de chaque flux.

3.5.1 Message de balisage

Le message de balisage est diffusé par chaque nœud du réseau afin de communiquer à ses voisins les informations utiles (tableau 3.1) pour la prise de décision du routage, tels que son identifiant, sa position (coordonnées) et son état actuel : libre, actif (s'il contribue à la construction d'un chemin) et bloquant (s'il ne parvient pas à trouver un voisin de prochain saut). Le message de balisage est envoyé en deux cycles : court et long. En effet, le cycle court intervient juste après le déploiement du réseau pour remplir les différentes tables de voisinage au niveau de chaque nœud et dont la structure est donnée dans le tableau 3.2. Tandis que le cycle long est utilisé périodiquement à une fréquence particulière définie par la nature de l'application envisagée, afin de confirmer ou mettre à jour les tables de voisinage surtout dans les cas de changement de topologie (mobilité, extinction et ajout des nœuds).

Il est à préciser que les champs de la table de voisinage sont mis à jour grâce aux messages de balisage reçus, mais également suite à la réception des messages de contrôle de la phase de construction de chemins, qui sera détaillée dans la section suivante.

TABLEAU 3.1 – Format du message de balisage (Beacon)

Coordonnée X	Coordonnée Y	EtatNœud
4 octets	4 octets	1 octet

TABLEAU 3.2 – Structure de la table de voisinage

Désignation du champ	Signification
Id du nœud	Identifiant du nœud voisin
Coordonnée X	Position X du voisin
Coordonnée Y	Position Y du voisin
Etat du nœud	Libre, actif ou bloquant
Temps de validité	Temps de visite du dernier beacon du voisin
Id de la source	Identifiant de la source
Id du sink	Identifiant du sink
Id du chemin	Identifiant du chemin auquel le nœud appartient
Etiquette du nœud	Numéro utilisé dans la phase d'optimisation

3.5.2 Message de contrôle

Le message de contrôle échangé pendant la phase de construction de chemins constitue le facteur clé de l'opération de routage. En effet, nous avons envisagé 4 types de message de contrôle afin de mieux cerner la phase de construction des routes qui se base sur la transmission multi-chemins pour chaque flux et également afin d'avoir par la suite un bon support pour nos prochaines contributions relatives à la maintenance des chemins défectueux, à la gestion économe de l'énergie et à l'interférence.

- GreedyForwarding : pour l'exploration des chemins par le routage glouton en se basant sur une fonction objective multi-critères qui sera détaillée davantage dans le chapitre 5;
- WalkingBack : pour revenir au prédécesseur en cas de situation bloquante et permettre d'avoir une progression vers le sink;
- Optimization : envoyé au plus proche prédécesseur par rapport à la source, afin d'optimiser le chemin trouvé;
- Liberation : envoyé dans deux cas de figure. Suite à la réception d'un message d'optimisation pour libérer les nœuds non optimisés et à la fin de la transmission des données pour libérer les nœuds appartenant aux chemins construits.

Le format du message de contrôle est donné dans le tableau 3.3, où *MsgType* reflète le type du message de contrôle utilisé, *EtatNœud* désigne l'activité de l'expéditeur, *NumEtiquette* concerne l'étiquette utilisée dans la phase d'optimisation et (*IdSource*, *IdSink*, *IdChemin*) sont les identifiants de la source, du sink et du chemin auquel le nœud expéditeur appartient.

TABLEAU 3.3 – Format du message de contrôle

MsgType	EtatNœud	NumEtiquette	IdSource	IdSink	IdChemin
1 octet	1 octet	2 octets	2 octets	2 octets	2 octets

3.5.3 Message de données

Le message de données est utilisé pendant la phase de transmission et sert à véhiculer les différents flux sur les chemins construits. La structure du message de données comprend les champs du tableau 3.3. *NSPaquet* désigne le numéro de séquence du paquet, *TempsPaquet* concerne le temps cumulé qu'a mis le paquet de la source vers le sink en passant par les différents nœuds intermédiaires, et *Données* représente les données capturées par le nœud source dont la taille maximale dépend de la nature de la plateforme cible de simulation ou d'expérimentation et liées aux buffers d'émission et de réception de la couche radio utilisée.

TABLEAU 3.4 – Format du message de données

NSPaquet	TempsPaquet	Données
2 octets	4 octets	1..N octets

3.6 Phases de fonctionnement

Avant de définir les différentes phases de fonctionnement de notre protocole de routage géographique multi-chemins (GM), nous rappelons que le schéma de déploiement est très important dans les réseaux de capteurs sans fil. En effet, il influence directement les métriques fondamentales d'efficacité telles que la couverture et la connectivité. A cet effet, la première étape que notre GM effectue après le déploiement du réseau est la reconnaissance du voisinage par l'échange des messages de balisage de cycle court afin de remplir tous les tables de voisinage. Par la suite, il procède en trois phases pour la transmission des paquets de données, à savoir : l'exploration des chemins à travers un routage géographique glouton, l'optimisation des chemins trouvés en supprimant les boucles et enfin le transfert de données sur les différents chemins construits.

3.6.1 Exploration du chemin

Lorsqu'un événement se produit, le nœud source le plus proche initialise le champ *NumEtiquette* à la valeur maximale, enregistre la signature du chemin (*IdSource*, *IdSink* et *IdChemin*), change son état à *Actif* et lance une phase d'exploration de chemins en envoyant un message de contrôle de type *GreedyForwarding* au voisin non actif le plus proche du sink. En effet, la requête *GreedyForwarding* ne sera pas envoyée aux voisins actifs (qui participent dans d'autres chemins), étant donné que les chemins de routage construits dans GM sont à nœuds disjoints (vue précédemment dans la section 2.5.1).

Dans le cas d'une réponse positive (*wasAcked*) du signal d'acquittement (*PacketAcknowledgements*) de l'interface (*ActiveMessageC*) envoyé par l'émetteur au niveau MAC. Ce dernier, s'il est la source, il initialise une table de routage sous forme de matrice, afin d'insérer tous les premiers nœuds de chaque chemin du moment que la transmission s'effectue sur multi-chemins. En revanche, si l'émetteur est un nœud intermédiaire, il marque juste le voisin comme son successeur.

Nous soulignons que GM repose sur l'interopérabilité de plusieurs couches (transport, réseau et MAC) et exploite la corrélation de fonctionnalités entre ces couches, particulièrement par les signaux d'acquittements qui d'un coté nous évitent la surcharge du réseau par les mes-

sages de contrôle et d'un autre coté, nous renseignent sur le déclenchement des mécanismes de tolérance aux pannes, qui seront détaillés dans le chapitre 5.

Le voisin, de son coté, met à jour sa table de voisinage, marque l'émetteur du *GreedyForwarding* comme son prédécesseur, sauvegarde le chemin (*IdSource, IdSink, IdChemin*), décrémente le champ *NumEtiquette* et explore le chemin de routage de la même façon que son prédécesseur et ainsi de suite pour tous les nœuds intermédiaires jusqu'à atteindre le sink.

En cas de blocage du nœud explorateur (impossible de trouver un nœud voisin de prochain saut), il envoie un message de contrôle de type *WalkingBack* à son prédécesseur pour l'informer de son état. Ce dernier le marque comme étant un nœud bloquant, met à jour sa table de voisinage et lance une autre requête d'exploration de chemins même-si son ensemble de nœuds relais *ForwardingSet* est vide tel décrit dans la section 3.3. L'organigramme de la figure 3.2 résume cette phase.

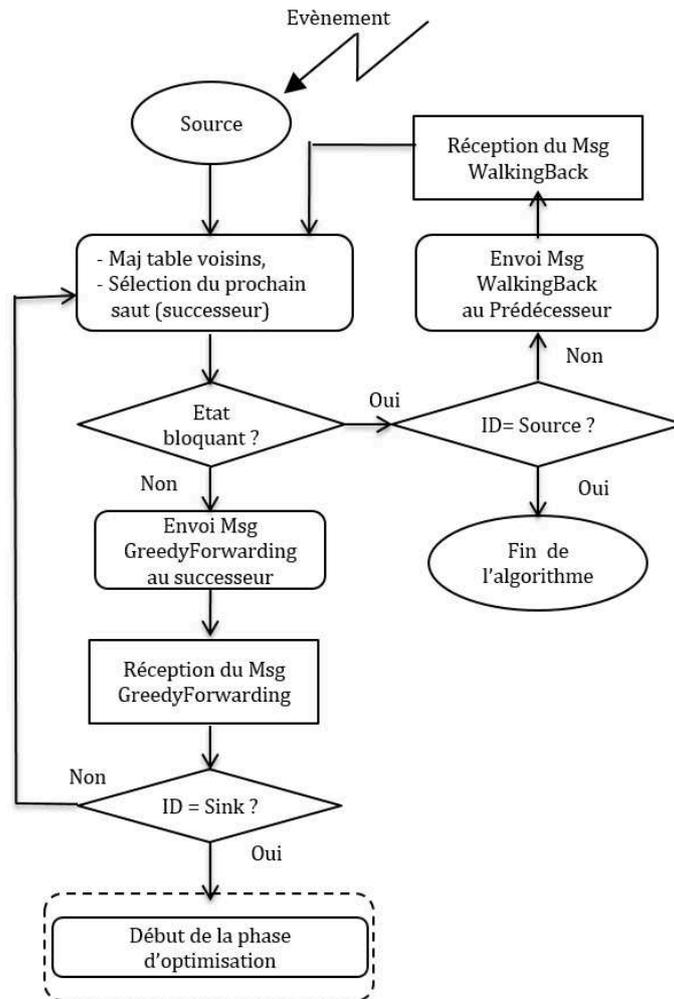


FIGURE 3.2 – Organigramme de la phase d'exploration du chemin

3.6.2 Optimisation du chemin

Une fois que le sink est atteint par le *GreedyForwarding*, il lance la phase d'optimisation du chemin trouvé par l'envoi du message de contrôle de type *Optimization* au plus proche prédécesseur par rapport à la source en termes de nombre de sauts. En effet, chaque nœud sélectionne parmi ses voisins qui appartiennent au même chemin que lui, celui qui a la valeur d'étiquette la plus grande pour lui envoyer le message d'optimisation comme indiqué dans la figure 3.4 de l'exemple récapitulatif. Si un nœud reçoit le message d'optimisation mais pas son succes-

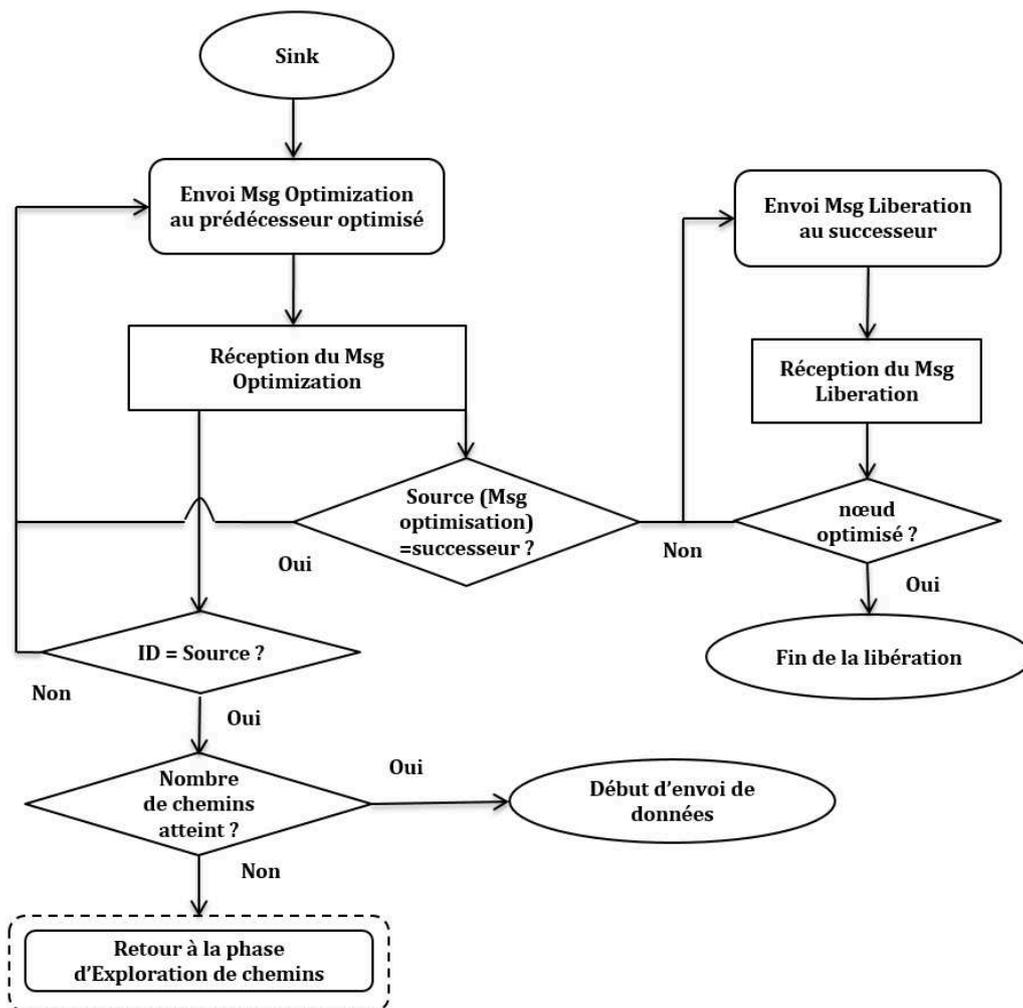


FIGURE 3.3 – Organigramme de la phase d'optimisation du chemin

seur direct de la phase précédente (exploration), il conclut qu'une optimisation s'est produite. Cependant, il envoie un message de contrôle de type *Liberation* à son successeur pour le libérer. L'envoi du message de libération se propage de successeur en successeur, jusqu'à l'arrivée au premier nœud optimisé (qui a été visité par le message d'optimisation). Cet enchainement se poursuit, tout au long du chemin inverse de l'exploration jusqu'à la source. Cette dernière répète le processus de construction de chemin autant de fois que possible jusqu'à atteindre le

nombre maximal de chemin *MaxPathNbr* défini par l'utilisateur selon la nature et les exigences de l'application.

Le but de cette phase est de libérer les nœuds qui font plus partie du chemin construit afin qu'ils puissent participer à la construction d'autres chemins et par conséquent augmenter la disponibilité du réseau en termes de nœuds libres. L'organigramme de la figure 3.3 décrit la phase d'optimisation et un exemple récapitulatif est donné dans la figure 3.4, afin d'illustrer le processus de construction de chemins défini par les deux phases complémentaires : exploration et optimisation.

3.6.3 Transmission de données

Une fois que l'exploration et l'optimisation des chemins se terminent, la source commence à envoyer les paquets de données en partageant le flux sur les différents chemins construits, et ce pendant toute la durée de capture de l'évènement.

A la fin de cette phase, un message de libération finale est diffusé par la source afin de relâcher les différents nœuds participant à la construction des chemins trouvés.

Exemple récapitulatif

Ci-après, un exemple récapitulatif de nos différentes phases proposées au protocole de routage géographique multi-chemins.

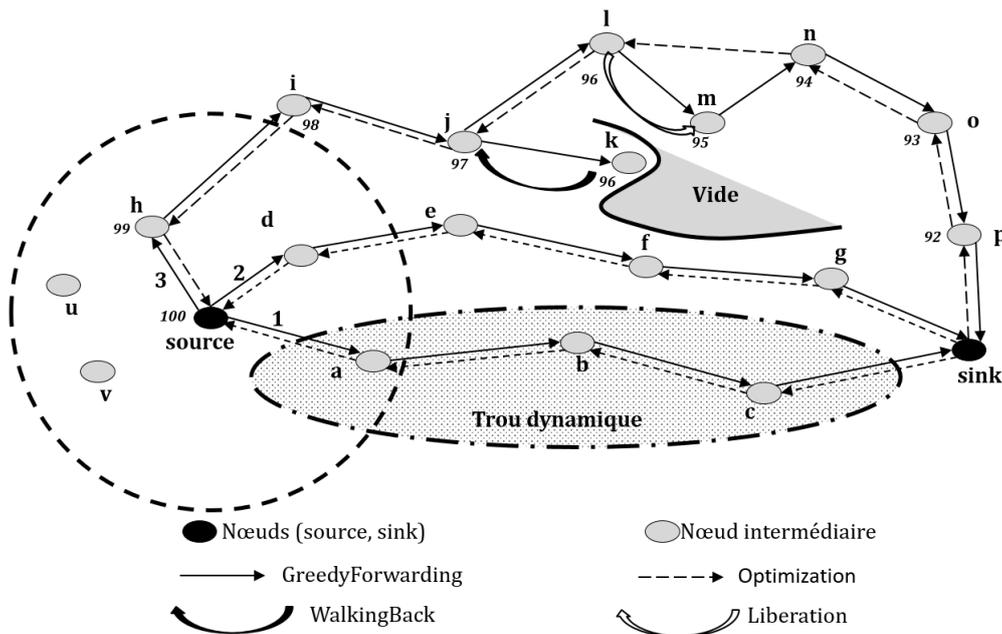


FIGURE 3.4 – La construction de chemins (exploitation et optimisation)

Suite à la détection d'un évènement par la *source*, cette dernière met son état à *Actif* et initialise son *Etiquette* à la valeur maximale (i.e. 100) puis déclenche la phase d'exploration du 1^{er} chemin à travers son *ForwardingSet* qui contient les nœuds (a,d) . Elle envoie le message *GreedyForwarding* (flèches pleines) au nœud a qui est le plus proche du *sink* que d .

Le nœud a entreprend la même démarche que son prédécesseur (*source*) et de même pour tous les nœuds intermédiaires (b,c) jusqu'à atteindre le *sink*. Ce dernier lance la phase d'optimisation de chemin en utilisant le chemin inverse de l'exploration (c,b,a) (flèches pointillées) jusqu'à la *source* qui sauvegarde dans sa table de routage le nœud a comme 1^{er} nœud. Ainsi le 1^{er} chemin construit est $Chemin1=(source,a,b,c,sink)$.

La *source* réitère la procédure de construction de chemin en passant cette fois par le nœud d du moment que le $FS(source)=(d)$. En effet, la construction de chemins est à nœuds disjoints et par conséquent, les nœuds (a,b,c) constituent un trou dynamique dans le réseau (zone hachurée). Le 2^{ème} chemin construit est donc $(source,d,e,f,g,sink)$ et la table de routage de la *source* sous forme de matrice comprend les nœuds (a,d) , telle que : $RoutingPath(source) = \begin{pmatrix} a & 1 \\ d & 2 \end{pmatrix}$

Le Nombre maximal des chemins de transmission (*MaxPathNbr*) est défini dans cet exemple à 3. La *source* n'ayant actuellement aucun nœud voisin dans son *ForwardingSet* ($FS(source)=\emptyset$), elle sélectionne le nœud du prochain saut parmi ses voisins dans son *NeighborSet* (*NS*) qui contient les (u,v,h,a,d) . En premier lieu, elle choisit les nœuds *Non-Actif*, c'est-à-dire parmi (u,v,h) puis dans cet sous-ensemble celui qui minimise la distance avec le *sink*. Dans ce cas le nœud h est élu pour la construction du 3^{ème} chemin. Le nœud h décrémente son *Etiquette* à 99 puis lance l'exploration de ce 3^{ème} chemin et ainsi de suite jusqu'au nœud k . Ce dernier étant un nœud *Bloquant*, il revient à son prédécesseur j par le *WalkingBack* qui le marque dans sa table de voisinage comme nœud *Bloquant* et relance l'exploration du chemin jusqu'au *sink*.

Quand le message d'optimisation parvient au nœud n , il consulte sa table de voisinage et compare les numéros d'étiquettes de ses deux voisins (l,m) . Le nœud l a la valeur la plus grande, ce qui permet de lui envoyer directement le message d'optimisation, sans passer par son prédécesseur m . Dès la réception du message *Optimization* par le nœud l , ce dernier s'aperçoit que l'émetteur est le nœud n et pas son successeur de la phase précédente m . Cependant, le nœud l conclut qu'une optimisation a eu lieu pour éliminer une boucle et envoie par conséquent un message de *Liberation* au nœud m afin de le libérer pour participer à la construction d'autres chemins.

A l'issue de cette construction le *MaxPathNbr* requis est atteint et le 3^{ème} chemin construit

est $\text{Chemin3} = (\text{source}, h, i, j, l, n, o, p, \text{sink})$ et et par conséquent $\text{RoutingPath}(\text{source}) = \begin{pmatrix} a & 1 \\ d & 2 \\ h & 3 \end{pmatrix}$.

Ce qui permet à la source de transmettre le flux de données en le partageant sur les 3 chemins construits.

3.7 Multiple paires (source,sink)

Transmettre les paquets de données dans les réseaux de capteurs sans fil est la tâche principale de tous protocoles de routage. La pluparts de ces protocoles se contentent de trouver un seul chemin optimal entre la source et le sink, tandis que les protocoles de routages conçus pour le transfert du contenu multimédia utilisent généralement multiple routes pour satisfaire les exigences requises par chaque application. Dans la réalité, plusieurs flux peuvent circuler en même temps dans le réseau rendant ainsi les conceptions qui se basent essentiellement sur une seule paire (source,sink) inadéquates et non réalistes.

Dans cette section, nous abordons la question relative à la gestion des transmissions multiples traduite par la progression des flux en même temps dans le réseau. Dans la littérature, très peu de travaux ont été orientés dans ce sens. D'une manière générale, si plusieurs paires (source,sink) apparaissent dans le réseau, elles doivent se partager la topologie.

Dans [5] quand la 1^{ère} paire (source1,sink1) rejoint le réseau, la *source1* diffuse un message contenant son emplacement ainsi que celui du *sink1*, en l'inondant dans tout le réseau pour savoir si d'autres paires existes. Lorsqu'une 2^{ème} paire rejoint le réseau (source2,sink2), la *source2* inonde à son tour le réseau par le message de localisation, mais cette fois la *source1* lui répond et définit par conséquent sa partie de transmission de données en divisant la topologie par la ligne $(\frac{\text{source1} + \text{source2}}{2}, \frac{\text{sink1} + \text{sink2}}{2})$ comme illustré dans la figure 3.5(a).

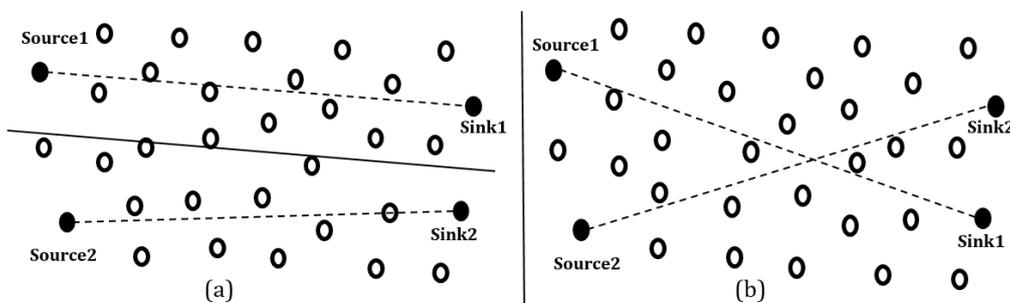


FIGURE 3.5 – Deux paires (source,sink) dans le réseau

Nous constatons que cette démarche n'est pas une solution adéquate pour le transfert du trafic dans les RCMSE. Primo en raison du nombre important des messages de contrôle échan-

gés relatifs aux positions des différentes paires. Secundo, en rapport avec les positions des paires en elles-mêmes surtout dans le cas où les deux lignes (source1,sink1) et (source2,sink2) se croisent, comme indiqué sur la figure 3.5(b). La solution proposée par [5] enregistre plus de faiblesse dans le cas où une 3^{ème} paire (source3,sink3) rejoint le réseau où le partage de la topologie dans ce cas de figure devient quasiment impossible.

Une autre approche pour la gestion des transmissions multiples dans les graphes planaires consiste à réduire les sources et les sinks en une seule paire (source,sink) fictive. Les deux nouveaux nœuds (source et sink) artificiels seront connectés respectivement à toutes les sources et à tous sinks originaux du réseau tel illustré dans la figure 3.6, avec pour contraintes :

- chaque lien sortant de la source fictive vers une source original reçoit une capacité égale à la capacité totale des liens sortants de cette dernière;
- chaque lien entrant au sink artificiel reçoit une capacité égale à la capacité totale de tous les liens entrants au sink original [40][4].

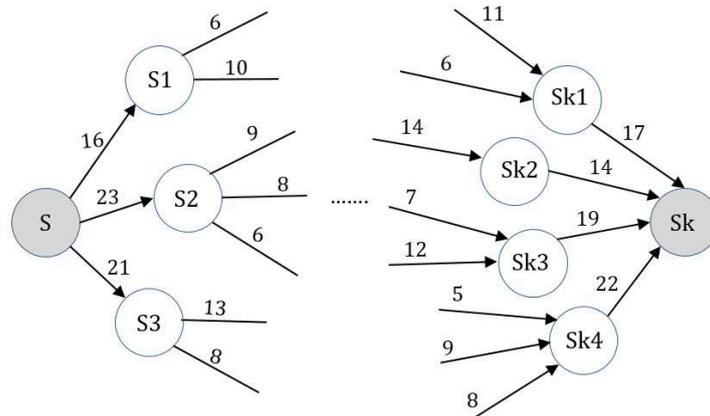


FIGURE 3.6 – Introduction d'une paire (source,sink) artificielle

Concevoir cette approche revient à résoudre le problème de débit maximum connu également sous le nom de (*Max Flow Problem*), formulé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } \sum_{l_{si} \in L} f_{si} \\ \sum_{l_{ij} \in L} f_{ij} = \sum_{l_{ji} \in L} f_{jj} \quad n_i \in \mathbb{N} \setminus \{n_s, n_d\} \\ \sum_{l_{is} \in L} f_{is} = 0 \\ \sum_{l_{di} \in L} f_{di} = 0 \\ f_{ij} \leq \text{Cap}_{ij} \quad \forall (i, j) \setminus l_{ij} \in L \\ f_{ij} \leq 0 \quad \forall (i, j) \setminus l_{ij} \in L \end{array} \right.$$

En revanche, cette démarche n'est adaptée pour les transmissions multiples dans les RCMSE. En effet, les évènements détectés peuvent provenir de plusieurs zones dans le réseau où les

sources peuvent être géographiquement très éloignées. Cependant regrouper tous les liens sortants de toutes les sources s'avère inapproprié. De plus, le graphe planaire (orienté) dans le cas d'un réseau de capteurs sans fil, a la particularité qu'aucun arc (lien) ne croise un autre, ce qui ne reflète pas la réalité des applications attendues.

Notre conception relative à la construction de chemins, permet au GM de supporter les envois simultanés des flux de données, même si les chemins de routages sont croisés tel mentionné dans la figure 3.7. Cela est dû en premier lieu à la stratégie apportée au *GreedyForwarding* basique, où chaque nœud sélectionne son successeur dans son *ForwardingSet*, et si ce dernier est vide, depuis son *NeighborSet* en excluant dans tous les cas les nœuds actifs. Ce qui permet de construire plusieurs chemins entre une paire (source,sink).

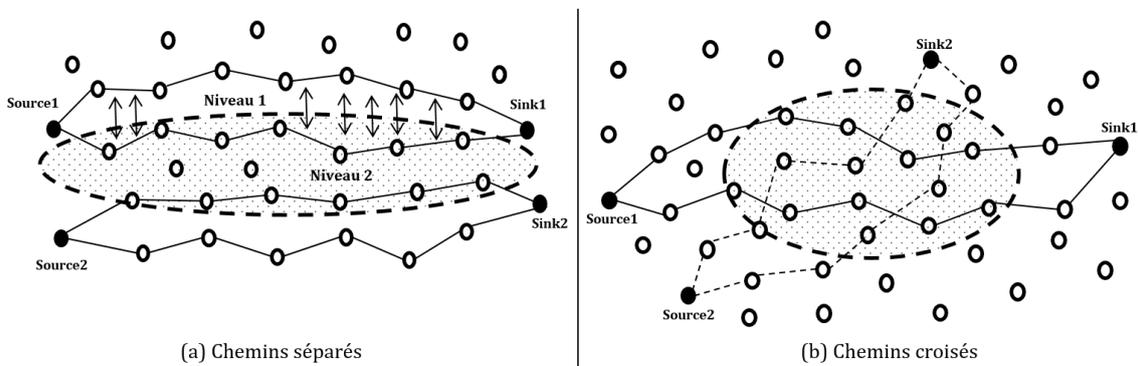


FIGURE 3.7 – Multiples transmission dans GM

De plus, nous avons adopté une fonctionnalité naturelle largement utilisée dans la communication radio, connue sous le nom de "Sur-écoute" (*Overhearing*) et qui consiste à recevoir ou écouter les paquets qui ne sont pas destinés au nœud courant. En effet, en partageant un médium sans fil, les données transmises par un nœud peuvent atteindre d'autres nœuds qui sont soit dans la portée de transmission de l'émetteur ou du récepteur. Cette fonctionnalité a été exploitée dans la phase d'exploration de chemins, notamment pour la sur-écoute des messages *GreedyForwarding*, *WalkingBack* et *Liberation*.

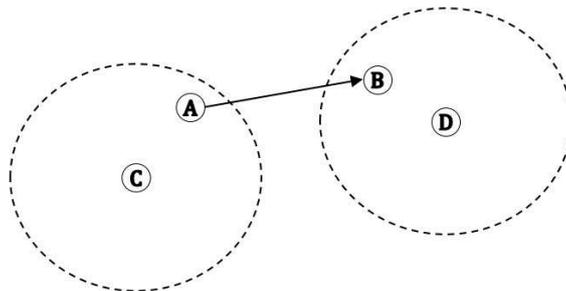


FIGURE 3.8 – Exemple de sur-écoute

La figure 3.8, schématise ce phénomène où lorsque le nœud A transmet au nœud B. L'envoi de A est sur l'écoute de C et la réception de B est sur l'écoute de D.

Par ailleurs, notre solution développée pour gérer les transmissions multiples en multi-chemins n'est pas à l'abri des interférences, relatives à la nature des transmissions radio. En effet, dans la figure 3.7 (a), nous apercevons que deux niveaux d'interférences peuvent coexister : entre les chemins de transmission au sein du même flux représenté par le niveau 1 et la zone hachurée (niveau 2). En revanche dans la figure 3.7 (b) où les chemins de transmission des deux flux sont croisés, la zone d'interférence est présentée par la zone hachurée en pointillé.

L'amélioration apportée aux interférences sera détaillée dans le chapitre 6 où nous essayons en premier lieu d'espacer les différents chemins de transmission dès la phase de construction pour limiter les interactions entre les chemins adjacents et de sélectionner le voisin qui a le moins d'interférences dans son *NeighborSet* afin de minimiser les collisions (sur-écoute des messages de données)

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un nouveau protocole de routage géographique multi-chemins baptisé GM, qui représente notre première contribution [39]. GM est principalement dédié au flux multimédia où sa conception se base sur : (1) la combinaison des approches réactive et proactive, (2) le routage géographique de type glouton et (3) la transmission des données sur multiples chemins.

Dans un premier temps, nous avons exposé notre approche hybride qui tire profit des techniques de routage réactive et proactive. Par la suite, nous avons clarifié notre méthode de sélection du prochain saut, poussant ainsi la limite du routage glouton connu sous le nom de "*Minimum Local*". Nous avons après détaillé les messages utilisés et les différentes phases de fonctionnement qui représentent d'une part le cœur de notre conception, et d'autre part une base pour nos prochaines contributions relatives à la tolérance aux pannes, à la gestion et aux interférences.

GM a la particularité de construire les plus courts chemins à nœuds disjoint en contournant les vides/obstacles statiques et d'accompagner cette construction par la phase d'envoi effectif de données sur multi-chemins où un exemple complet qui les récapitule a été présenté.

Le but principal de tous les protocoles de routages est de véhiculer les flux de données d'un point à un autre dans le réseau. La réalité nous reflète la contrainte des transferts simultanés, c'est pourquoi une partie de notre conception était orientée dans ce sens afin de gérer cette multitude de transmissions.

Dans les chapitres de la partie suivante, nous abordons la partie sensible dans la transmission des flux multimédia volumineux relative aux différentes pannes et facteurs qui rendent le réseau très vulnérable.

Deuxième partie

Le tolérance aux pannes dans les Réseaux de Capteurs Multimédia Sans Fil (RCMSF)

Chapitre 4

Généralité sur la tolérance aux pannes dans les RCMSF

Sommaire

4.1 Introduction	61
4.2 Types de pannes	61
4.2.1 Selon la durée	61
4.2.2 Selon la cause	62
4.2.3 Selon le comportement	63
4.2.4 Selon la couche de communication	63
4.3 Procédure de tolérance aux pannes	64
4.4 Protocole de routage économe en énergie	65
4.5 Classification des techniques de tolérance aux pannes	67
4.5.1 Classification temporelle	68
4.5.2 Classification architecturale	68
4.6 Conclusion	71

4.1 Introduction

Les diverses raisons de défaillances qui affectent la fiabilité des nœuds capteurs en plus du traitement et du transfert en temps réel du contenu multimédia volumineux (image, audio et vidéo) posent de nos jours un grand défis aux protocoles de routage dans les RCMSF [41]. En effet, les capteurs sont susceptibles de tomber en panne vue les environnements hostiles dans lesquels ils peuvent être déployés et causent par conséquent une baisse de performance qui peut entraver le fonctionnement du réseau. Face à une telle situation, la durée de vie globale du réseau diminue et entraîne des conséquences dangereuses, notamment pour les applications critiques et gourmandes en énergie.

De plus, la panne d'un nœud capteur provoque la perte du liens de communication et engendre un changement considérable dans la topologie du réseau, ce qui impact directement sur les fonctions de base telles que la couverture et la connectivité. C'est pourquoi, la tolérance aux pannes est considérée comme une préoccupation fondamentale dans les réseau de capteur d'une manière générale et l'un des paramètres de robustesse des réseaux de capteur multimédia. En effet, elle détermine le niveau de fiabilité du réseau et se définit par la capacité de maintenir le système stable et sans interruption, et ce en dépit des nombreuses pannes qui peuvent survenir à l'un ou certains de ses composants.

Dans ce chapitre, nous nous focalisons en premier sur l'identification et la catégorisation des pannes qui peuvent surgir dans le réseau sous diverses formes, puis nous présentons une procédure générale pour les traiter sur plusieurs étapes. Par la suite nous nous intéressons à certains protocoles de routages économes en énergie. En dernier, nous dressons une classification des techniques tolérantes aux pannes qui représentent des solutions dans ce domaine.

4.2 Types de pannes

Les nœuds sources font appel à la communication multi-sauts pour véhiculer les informations captées aux sinks, à travers des nœuds intermédiaires. Ces derniers sont sujets à de nombreux dysfonctionnements tel que illustré dans la figure 4.1, où différents type de pannes sont présentés selon la durée, la cause, le comportement et les couches de communication.

4.2.1 Selon la durée

Basée sur la durée, la panne peut être :

- **Transitoire** : en raison d'un impact temporaire, la défaillance peut disparaître sans aucune intervention;

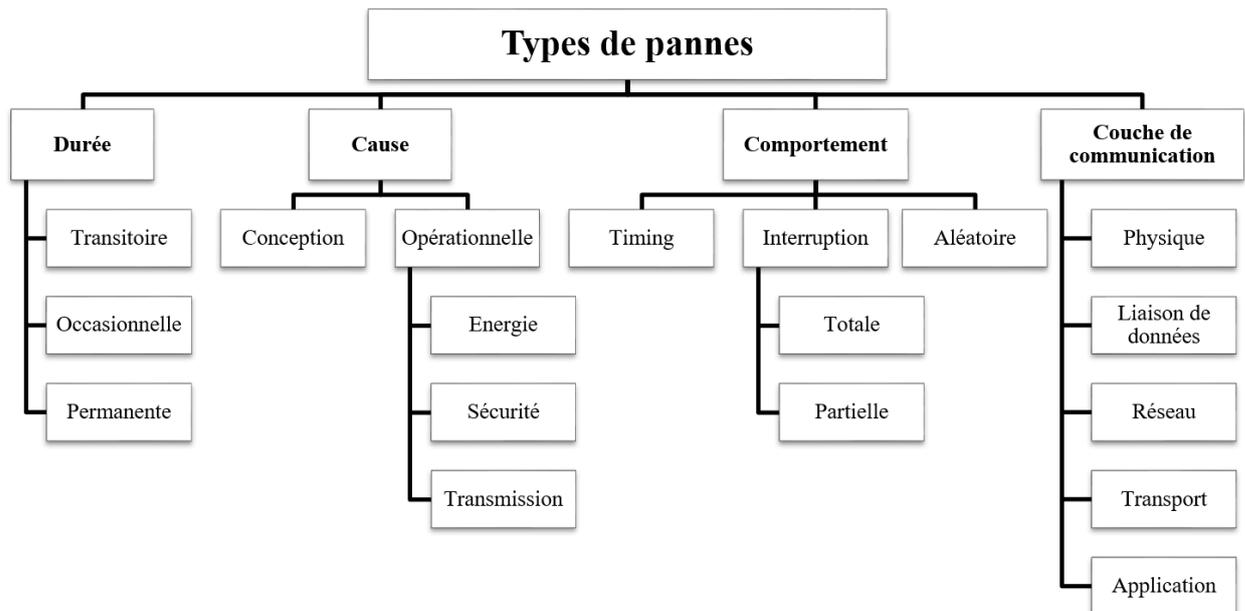


FIGURE 4.1 – Différents types de pannes

- **Occasionnelle** : l’instabilité de certains composants matériels, l’exécution d’un programme non adéquat ou dans un environnement particulier sont à l’origine de ce type de défaillance. La panne occasionnelle se produit d’une manière imprévisible telle que la surchauffe du composant qui nuit à son propre fonctionnement pendant une période de temps;
- **Permanente** : la panne permanente persiste tant qu’il n’y a pas d’intervention extérieure pour la résoudre. Elle est continue et stable dans le temps. Un changement physique dans un composant provoque une défaillance matérielle permanente

4.2.2 Selon la cause

Selon la cause, deux types se distinguent :

- **Conception** : généralement apparaît suite à une mauvaise configuration du réseau ou un choix inapproprié du composant;
- **Opérationnelle** : surgit durant le fonctionnement du système et est causée par les défaillances physiques.
 - **Energie** : l’épuisement de la batterie provoque l’arrêt du capteur. En effet, la consommation d’énergie est très importante pour déterminer la durée de vie d’un capteur et par conséquent de tout le réseau;
 - **Sécurité** : le manque de sécurité dans les réseaux de capteurs augmente le risque de pannes telle que la destruction physique accidentelle ou intentionnelle;

- **Transmission** : la nature vulnérable des transmissions radios, la présence d'obstacles ainsi que les interférences peuvent engendrer des pertes et des collisions de paquets lors du transfert de données.

4.2.3 Selon le comportement

Après l'occurrence d'une panne, trois types de panne possible selon le comportement du composant :

- **Timing** : le composant effectue son traitement mais délivre les résultats tardivement ;
- **Interruption** : dans l'interruption totale (crash) le composant s'arrête complètement de fonctionner ou n'est plus capable d'assurer ses services. Tandis que dans l'interruption partielle, le composant fonctionne mais dans un état instable en retournant parfois des résultats erronés ;
- **Aléatoire** : le comportement du composant est imprévisible et est de nature arbitraire. Ce type de panne est considéré comme le plus difficile à gérer.

4.2.4 Selon la couche de communication

Au niveau de chaque couche de la pile protocolaire dans les RCMSF, multiples pannes peuvent être énumérées, à savoir :

- **Couche physique** : dans cette couche, les erreurs sont le résultat de la défaillance d'un ou de plusieurs composants du capteur, tels que l'unité de capture, de traitement ainsi que les sous-systèmes de communication ou de coordination...etc. En plus, de l'environnement hostile dans lequel le réseau est déployé, la qualité des composants joue un rôle important dans ce type de panne, où une mauvaise batterie, qui se décharge rapidement et atteint un seuil critique lors de l'activité du capteur conduit à des lectures incorrectes.
- **Couche liaison de données** : les différents niveaux d'interférences entre les chemins de transmission dans un réseau tel mentionné dans la section 3.7, perturbent les réceptions des paquets de données à un saut surtout dans le cas où plusieurs sources émettent en même temps.
- **Couche réseau** : considérée comme l'une des couches les plus critiques dans la pile protocolaire. Les pannes de cette couche sont principalement au niveau des liens de communication sans fil, telle que les interférences et les exigences en QoS de chaque application (les données à faible débit à temps critiques et les données audio/vidéo à haut débit). En effet, les mécanismes de retransmission, le transfert en multi-chemins et la

communication multi-canal permettent de surmonter ces contraintes et d'améliorer les performances.

- **Couche transport** : la transmission à un débit élevé des flux multimédia volumineux provoquent des collisions et des pertes de paquets. Ce type de panne temporelle nécessite des retransmissions dans le cas des applications non-critiques. Par ailleurs, l'absence de mécanisme d'ordonnancement efficace peut être également une cause de panne dans cette couche. En effet, le transfert de données sur plusieurs chemins nécessite un réordonnancement en cas de réception des données dans des séquences inappropriées.
- **Couche application** : dans la transmission des flux multimédia, chaque application à ses propres exigences où un degré de tolérance est attribué. En effet, les différents bogues au niveau des logiciels systèmes implémentés ou middleware (communication, routage et agrégation des données) représentent les sources d'erreurs dans cette couche tels que le mauvais contrôle d'admission ou la mauvaise gestion du trafic.

4.3 Procédure de tolérance aux pannes

Etant donné que les nœuds capteurs sont soumis aux échecs, le réseau doit être en mesure de les détecter et d'y remédier. De même, les capteurs doivent être capable de repérer les capteurs défectueux qui envoient des informations erronées ou qui ne sont pas apte de fournir des informations utiles en raison de leur état. La conception d'une procédure de tolérance aux pannes dépend de l'architecture et des fonctionnalités du système. Néanmoins, certaines étapes sont communes à la plupart des systèmes [42] [43], comme le montre la figure 4.2 suivante :



FIGURE 4.2 – Procédure de tolérance aux pannes

- **Détection de la panne** c'est le premier maillon dans la chaîne de tolérance aux pannes, qui nous permet de reconnaître qu'un événement inattendu est survenu. Les techniques utilisées sont classées en deux catégories en ligne (Online) et hors ligne (Offline). La détection hors ligne est effectuée à l'aide de programmes de diagnostic qui s'exécutent lorsque le système est inactif. Tandis que, la détection en ligne, permet d'identifier les défaillances en temps réel et est effectuée en pleine activité du système.

- **Détention de la panne** cette phase se charge de cerner les limites de l'impact de la panne sur le système, afin d'empêcher la propagation vers d'autres régions.
- **Recouvrement de la panne** : durant cette phase, les opérations d'élimination des défauts sont effectuées. Deux techniques principales sont utilisées. Dans la récupération arrière (*Backward recovery*), l'état du système est restauré à un état antérieur sans erreur à l'aide des sauvegarde périodiques. En revanche, dans la récupération anticipée (*Forward recovery*), aucun état antérieur du système n'est disponible. Le but est d'aller en avant et atteindre un état cohérent exempter d'erreurs avec une connaissance au préalable de la nature exacte de la panne.
- **Traitement de panne** : cette phase est responsable de l'isolation du composant défaillant. La procédure de réparation dépend du type de panne et de la nature du déploiement. Les défaillances permanentes nécessitent le remplacement du composant par un autre fonctionnel, ce qui n'est pas réalisable dans la plupart des situation où les capteurs défectueux sont inaccessibles.

4.4 Protocole de routage économe en énergie

La limitation de la ressource énergétique influence sur la stabilité du réseau et réduit sa durée de vie. Avec une réserve limitée, le capteur doit minimiser son coût énergétique en termes de calcul, de transmission et de stockage. L'utilisation efficace de cette ressource était et reste une des principales considérations lors de la conception des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs multimédia sans fil [44].

A cet effet, nous nous focalisons dans notre approche tolérante aux panes qui sera décrite dans le prochain chapitre sur les pannes opérationnelles qui surviennent durant le fonctionnement du système en temps réel. Cependant, comme certains protocoles de routage éco-énergétiques ont été étudiés dans [9], nous présentons et discutons dans cette section quelques propositions liées à nos amélioration.

Afin de réduire la consommation d'énergie, de nombreuses solutions ont été proposées, comme dans [45] où les auteurs traitent ce problème au niveau de la couche MAC. Le protocole proposé considère le réseau à un saut et évite les collisions en exécutant un code pendant une courte période et passe en mode sommeil le reste du temps. Son point faible réside dans l'échange élevé de messages en raison de sa structure en anneau, notamment le chemin abstrait. Dans ce dernier, la redondance de transmission entre clusters afin d'atteindre la station de base pour les données regroupées présente un surcout énergétique.

Pour améliorer l'efficacité du routage QoS, les auteurs de [46] utilisent un système de routage dynamique et économe en énergie, basé sur l'angle d'inclinaison et la distance de transmission entre les nœuds. Le but étant d'optimiser la sélection de l'ensemble de candidats expéditeur. L'approche proposée utilise le protocole ADSR [18] qui n'est pas approprié pour les applications temps réel en raison de sa latence élevée.

L'énergie résiduelle des nœuds est prise en compte lors du processus d'identification de chemin dans EA-TPGF [14], qui est une extension de TPGF [47]. Ce dernier choisit toujours le chemin le plus court en dépit de l'énergie restante. L'inconvénient majeur de EA-TPGF se résume par le grand nombre de sauts engendrant un délais de transmission important et une forte congestion dans le réseau. De plus, les auteurs se sont concentrés uniquement sur la phase de découverte de chemins au détriment de phase de transmission.

Un protocole de routage multi-chemins économe en énergie et en QoS qui maximise la durée de vie du réseau en équilibrant la consommation d'énergie est proposé dans [48]. EQSR utilise l'énergie résiduelle pour prédire le meilleur prochain saut pendant la phase de construction de chemins. Basé sur le concept de différenciation des services, EQSR utilise un modèle de file d'attente pour gérer le trafic temps réel et non temps réel. Il permet au trafic important d'atteindre le nœud récepteur dans un délai acceptable. Son principale inconvénient est la surcharge du réseau par l'échange d'un grand nombre de messages "RREQ" et "INUSE".

Les auteurs de [34] proposent un protocole de routage hiérarchique et efficace en énergie et en QoS avec une architecture multi-sink (un pour chaque cluster). EEQR réduit la dissipation d'énergie à chaque nœud et assure le délai de bout en bout pour les données temps réel, tout en augmentant le débit des données non temps réel. Toutefois, EEQR enregistre certaines faiblesses, tel l'utilisation d'un seul chemins de routage, qui n'est pas recommandé pour la transmission des données multimédia et la bande passante utilisée.

Dans [49], un protocole de routage multi-chemins efficace en énergie est proposé en utilisant l'énergie résiduelle des nœuds et l'intensité du signal reçu, pour atténuer les chemins surchargés. Néanmoins sa faiblesse consiste le fait qu'il inonde le réseau par les requêtes diffusées par le récepteur afin de construire les tables de voisinage à chaque nœud.

Un protocole de routage géographique angulaire adaptatif (AGEM)[23] est proposé pour assurer l'équilibrage de charge et minimiser la consommation d'énergie entre les nœuds en utilisant un processus intelligent de transfert glouton. Inspirés par cette technique et utilisant une méthode de routage avec QoS, les auteurs de [27] présentent un protocole de routage économe en énergie qui réduit la consommation et garantit la QoS pour les services multimédias.

Dans [50], une combinaison de mécanisme de confiance, d'agrégation de données et de

tolérance aux pannes est proposée pour améliorer l'exactitude et la fiabilité des informations collectées dans les RCMSE. Le protocole proposé génère des frais de routage et de calcul élevés en échangeant les informations de confiance. Cet échange d'informations conduit à de fausses attaques de signalement où un nœud malveillant peut propager de fausses informations pour diminuer la cote de confiance du nœud réputé [51].

4.5 Classification des techniques de tolérance aux pannes

La tolérance aux pannes est un facteur incontournable à prendre consciencieusement en compte dans la conception des protocoles de routage dans les RCMSE, en raison d'innombrables contraintes telles que : la décharge énergétique des batteries généralement irremplaçables, le manque de fiabilité des communications radio, les défaillances matérielles/logiciels ainsi que la perception sectorielle multidimensionnelle des capteurs multimédia (vue précédemment dans la section 1.2.2), où le coût exorbitant du redéploiement présente un handicap pour la réorganisation du réseau en cas de panne d'un ou de plusieurs composants. En effet, nous classons les approches de tolérance aux pannes en trois catégories distinctes, à savoir : temporelle, architecturale et selon le niveau d'implémentation.

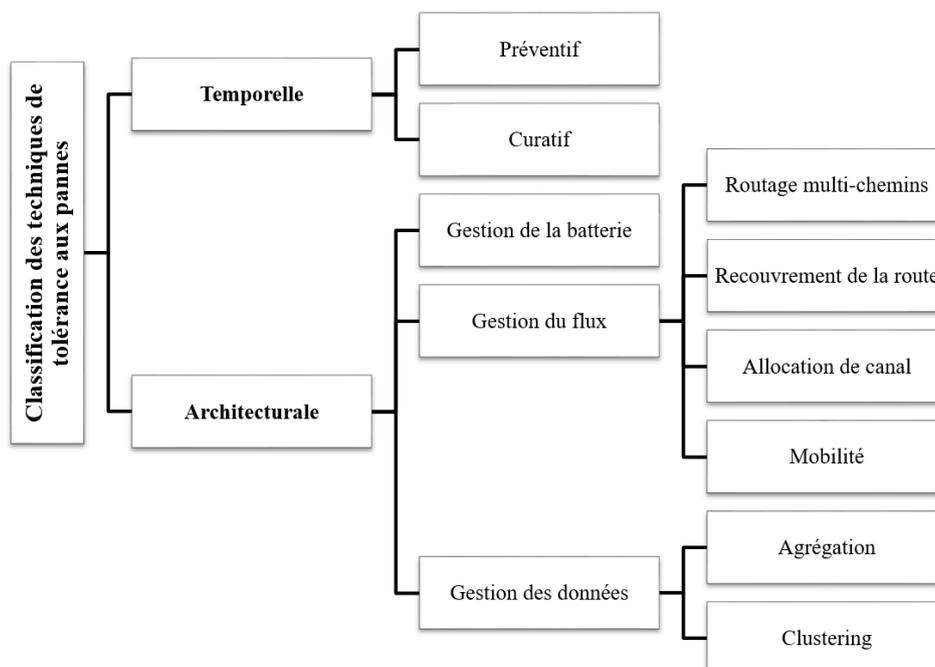


FIGURE 4.3 – Classification des techniques de tolérance aux pannes

4.5.1 Classification temporelle

Dans cette classe, les protocoles sont divisés selon la phase de traitement en pré-panne (préventif) ou post-panne (curatif). La classification temporelle est basée sur l'instant où la procédure de tolérance est déclenchée, respectivement avant que la panne se produit ou après son occurrence.

Préventif

Cette catégorie implémente des techniques et mécanismes qui tentent de retarder ou éviter tout type d'erreur afin de préserver les fonctionnalités du réseau le plus longtemps possible. En effet, les protocoles préventifs optimisent l'utilisation des ressources disponibles et mettent en œuvre différentes alternatives de sorte qu'une panne n'affecte pas l'ensemble des services fournis.

Nous distinguons deux niveaux d'application des techniques préventives : niveau nœud et niveau réseau. Au niveau nœud, le but est de prolonger la durée de vie du capteur en utilisant des stratégies de mise en veille afin de gérer efficacement son énergie résiduelle et éviter par conséquent toute extinction prématurée de la batterie. Tandis qu'au niveau réseau, les techniques adoptées visent à construire des chemins de routage alternatifs afin d'assurer l'équilibrage de charge dans le réseau, et augmenter ainsi sa durée de vie.

Curatif

Les protocoles curatifs, appelés également optimistes, ne déclenchent le mécanisme de tolérance aux pannes adéquat que lorsque la panne est apparue dans le réseau afin de rétablir son bon fonctionnement. Plusieurs approches sont utilisées dans cette sous-classe tel que l'activation des nœuds redondants initialement en veille ou le remplacement des nœuds défaillants.

4.5.2 Classification architecturale

Nous pouvons également voir la tolérance aux pannes d'un point de vue architectural, qui traite la gestion des différents types de composants, tant au niveau capteur qu'au niveau réseau

Gestion de la batterie

Considéré comme une approche préventive, elle vise à établir une répartition uniforme de la dissipation d'énergie entre les nœuds capteurs, afin de mieux gérer la consommation d'énergie et augmenter ainsi la durée de vie de tout le réseau. La technique du cycle de service (*Duty-Cycling*) est utilisée pour déterminer le pourcentage d'activité des nœuds. En effet, elle

définie le délais de mise en veille des nœuds inactifs pour une meilleure conservation d'énergie. Dans McTPGF [52], qui est une extension de TPGF, le délai de sommeil (*Sleeping Delay*) est pris en compte dans la décision de routage. Cependant, cette métrique permet de construire un chemin avec un faible délais de sommeil cumulé, qui présente la plus courte durée de bout-en-bout. En revanche, les faiblesses de McTPGF résident dans le fait qu'il utilise un seul chemin de routage en plus du nombre de sauts supplémentaire par rapport à TPGF.

Gestion du flux

Cette catégorie regroupe les techniques préventives ou curatives relatives à la gestion du transfert de données (routage, accès au canal de transmission...etc.) sur les différentes couches de la pile de communication.

- **Routage multi-chemins** : utilise un algorithme préventif pour établir plusieurs chemins entre la source et le sink. Cela garantit la présence de chemins fiables pour la transmission et offre une récupération rapide du transfert en cas de défaillance. Dans [38], un protocole de routage tolérant aux pannes, basé sur le protocole DSR [53] conventionnel est proposé. Il essaie de trouver deux chemins de routage entre la paire (source,sink). Son principale inconvénient est l'utilisation d'une route unique pour la transmission, ce qui provoque une surcharge aux nœuds constituant ce chemin. En outre, en cas d'échec, le protocole utilise la route secondaire et par conséquent tous les paquets qui ont emprunté le chemin défectueux sont perdus.
- **Recouvrement de la route** : c'est une technique curative qui crée un chemin alternatif suite à la détection de panne pour assurer la retransmission des données. Afin d'assurer la fiabilité des données transmises, le protocole proposé dans [54], met continuellement à jour l'état des routes tout en transmettant les données simultanément. En cas de panne imprévue dans le chemin de transmission principale, il lance la route secondaire maintenue par les messages de contrôle. Le désavantage majeur est l'inondation du réseau par les requêtes de mise à jour et de contrôle, en plus de la surcharge des nœuds participant, ce qui épuise leur énergie résiduelle.
- **Allocation de canal** : implémentée au niveau de la couche MAC, cette solution effectue l'allocation du canal de transmission dans le but de réduire les interférences entre les nœuds adjacents et d'éviter les collisions de paquets lors du transfert. Le protocole de routage CUDAR (*Channel Use and Delay Aware Routing*) proposé permet de satisfaire les paramètres (débit, délai et gigue) de la QoS en exploitant un module adaptatif d'utilisation du canal dans la couche MAC.

- **Mobilité** : cette approche permet d'introduire certains nœuds mobiles dotés de capacité supérieure (énergie et calcul). Ces derniers se chargent de collecter les données en se déplaçant entre nœuds capteurs du réseau. Ceci permet une économie de la consommation énergétique en réduisant le nombre de sauts des paquets transmis. Dans [55], une approche pragmatique relative au déplacement des capteurs mobiles dans les zones non-couvertes est proposée afin d'assurer la couverture totale de la zone d'intérêt dans les réseaux de capteurs hybrides. Son principal inconvénient se situe dans le processus de recouvrement et de détection des trous qui sont lancés uniquement par le sink.

Gestion des données

Les solutions apportées dans cette catégorie offrent une meilleure gestion des données ainsi que leur traitement. Deux principales sous-catégories en dérivent :

- **Agrégation** : considérée comme une approche préventive, l'agrégation effectue le traitement supplémentaire sur les données brutes collectées dans l'environnement en combinant les données capturées par plusieurs nœuds afin de réduire la quantité de données transmises. En effet, le nœud agrégateur combine les données provenant de plusieurs nœuds en une information significative, ce qui réduit considérablement la quantité de données redondantes transmises. Dans [50], une combinaison de mécanisme de confiance, d'agrégation et de tolérance aux pannes est proposée pour améliorer la fiabilité des données. En revanche, l'approche adoptée engendre une surcharge de calcul tout en échangeant les informations de confiance. Cet échange d'informations conduit à un faux rapport d'attaque où le nœud malveillant peut propager de fausses informations pour diminuer le taux de confiance du nœud agrégateur [51].
- **Clustering** : cette technique préventive, considérée également comme curative, traite la structure des réseaux de capteurs et permet de constituer un *backbone* virtuel pour une meilleure utilisation des ressources telles que la bande passante et l'énergie. Par ailleurs, le clustering aide à réaliser du multiplexage entre différents clusters en améliorant les performances des algorithmes. Un mécanisme de transmission basé sur les clusters avec les changements dynamiques des chemins a été proposé dans [56]. Cependant, sa limite réside dans le canal de communication où les attaques malveillantes contre les modèles de confiance n'ont pas été prises en compte [57].

4.6 Conclusion

Dans ce 1^{er} chapitre de cette partie, nous avons évoqué les concepts fondamentaux de la tolérance aux pannes dans les réseaux de capteurs multimédia sans fil. En effet, ce volet est un paramètre indispensable pour maintenir le fonctionnement du réseau et garantir la QoS exigée dans la transmission des flux. Nous avons catégorisé en premier lieu les différents types de pannes puis nous avons exposé la procédure adéquate pour les tolérer. Par la suite, nous avons exposé quelques protocoles économes en énergie en rapport avec nos prochaines contributions. Enfin, une classification générale des techniques tolérantes aux pannes dans les RCMSF selon plusieurs critères a été présentée.

Le prochain chapitre sera consacré à nos contributions et mécanismes de tolérance aux pannes développés et injectés dans GM. Nos solutions interviennent au moment de la transmission des données en temps réel rendant ainsi le protocole développé économe en énergie, adaptatif au changement et hybride de fonctionnement à contraintes multiples définie dans la fonction objective du choix du prochain saut.

Chapitre 5

Mécanismes de tolérance aux pannes dans les RCMSF

Sommaire

5.1 Introduction et motivations	73
5.2 Modèle d'énergie	74
5.3 Fonction objective pour le choix du prochain saut	76
5.4 Modélisation théorique du Nombre de Paquets Perdus	80
5.5 Mécanisme de réparation	82
5.5.1 Messages utilisés	83
5.5.2 Déroulement	83
5.6 Mécanisme de prévention	86
5.6.1 Messages utilisés	86
5.6.2 Déroulement	86
5.7 Conclusion	87

5.1 Introduction et motivations

Les applications multimédias véhiculent une grande masse de données qui nécessite un taux de transmission élevé et un traitement intensif, et par conséquent, une consommation d'énergie importante [44]. Transmettre efficacement ces flux de données tout en assurant leur fiabilité et garantir les exigences de QoS avec les ressources limitées disponibles, en particulier dans les contextes critiques et les réseaux défectueux demeure une problématique ouverte dans les RCMSF. Compte tenu du très faible nombre de protocoles de routage qui ont approché la phase expérimentale et encore moins ceux qui ont abordé le problème lié à la tolérance aux pannes pendant de la transmission de données en temps réel [58].

Les diverses solutions existantes proposées dans ce contexte souffrent d'un mauvais compromis entre la scalabilité du réseau et le niveau de tolérance offert par la topologie produite [41] et ne couvrent pas les problèmes de rupture des liens de communication pendant le transfert des données. En effet, la plupart des protocoles de routages se focalisent sur la découverte des chemins au détriment de la phase de transmission souvent négligée. Cette phase est d'une grande importance, car toute perturbation de la qualité de transmission impacte directement sur la qualité du flux au niveau du récepteur tel que le streaming vidéo. De plus, le contenu multimédia est généralement caractérisé par une longue durée de diffusion et une taille volumineuse, ce qui a pour effet, l'épuisement des batteries irremplaçables des nœuds capteurs durant cette phase.

Par ailleurs, en s'appuyant sur les limites du routage géographique glouton décrit dans la section 2.4, où nous avons déjà apporté deux améliorations tel mentionnées dans la section 3.3, nous soulevons dans ce chapitre la contrainte principale du routage hors ligne (*Offline*), dans le sens où la découverte de chemins se fait avant l'envoi effectif des données. Cependant, les chemins construits peuvent ne pas refléter la réalité du réseau au moment de la transmission des données surtout en cas de mobilité ou de pannes.

A cette fin, nous avons jugé opportun de prévoir des stratégies et mécanismes afin d'assurer la fiabilités des données transmise et maintenir la stabilité du réseau en préservant les chemins opérationnels durant la phase de livraison. Ainsi, nous pallions au plus grand problème du routage hors ligne en gardant la connectivité et les fonctionnalités du réseau même dans les environnements hostiles sujets aux erreurs.

Dans ce chapitre, nous détaillons nos contributions implémentées au niveau du protocole de routage géographique multi-chemins décrit précédemment dans le 3^{ème} chapitre du présent manuscrit en le dotant de moyens qui lui permettent de s'adapter aux changements et de tolérer les éventuelles pannes qui peuvent surgir.

1. La 1^{ère} contribution que nous proposons est l'introduction de la métrique énergétique (énergie résiduelle et énergie initiale) ainsi que la puissance de réception, comme paramètres dans la fonction objective du choix du prochain saut, afin d'alléger les chemins optimaux et d'assurer un bon équilibrage de charge dans le réseau, ce qui prolonge positivement sa durée de vie et augmente la probabilité de réception des paquets [44].
2. La 2^{ème} contribution correspond au modèle théorique relatif à la modélisation du nombre de paquets perdus (NPP) lors du transfert des flux de données en temps réel. En effet, la formation des trous dynamiques dans le réseau engendre des pertes significatives qui peuvent fausser ou distordre le contenu des données transmises [41].
3. La 3^{ème} contribution concerne les pannes soudaines, liées aux défaillances matérielles, aux destructions physiques et aux changements de topologie. Le mécanisme curatif des chemins défectueux nommé FCM (*Faulty-paths Curative Mechanism*) intervient lorsque le nœud qui précède le nœud défaillant s'aperçoit de la disparition de son successeur via les acquittements négatifs après un certain nombre d'envois. Le but étant d'empêcher les pertes des paquets et d'augmenter le taux de fiabilité du réseau [41].
4. La 4^{ème} contribution est relative au mécanisme de prévention EPM (*Energy-efficient Preventive Mechanism*) qui est déclenché lorsque l'énergie résiduelle du nœud atteint un seuil critique au moment de la transmission en temps réel. L'objectif est d'anticiper l'épuisement précoce des batteries, ce qui permet de maintenir les liens de communication opérationnels sans aucune perte ni interruption [44].

5.2 Modèle d'énergie

L'énergie consommée dépend des types de dispositifs implémentés dans le module radio, de la taille des données à transmettre et de la qualité du canal de communication [44]. C'est alors une modélisation de l'énergie du nœud liée à une estimation de la quantité d'information.

Le modèle de consommation d'énergie suppose que la transmission d'énergie est composée d'une quantité d'énergie constante et d'une énergie de propagation proportionnelle à la distance entre l'émetteur et le récepteur puissance 2 ou 4, selon que la distance est supérieure ou inférieure à une distance de référence [44].

Basé sur le modèle de dissipation d'énergie radio simplifié et utilisé dans [44][59], l'énergie consommée lors de la réception est caractérisée par :

$$E_R(k) = kE_{elec} \quad (5.1)$$

k : taille de la donnée en bit

E_{elec} : dissipation d'énergie par bit de l'émetteur (50nJ/bit).

Tandis que l'énergie consommée pendant la transmission est illustrée par :

$$E_T(k) = kE_{elec} + kE_{amp} \quad (5.2)$$

Avec

$$\begin{cases} E_{amp} = \epsilon_{fs}d^2 & d < d_0 \\ E_{amp} = \epsilon_{amp}d^4 & d \geq d_0 \end{cases}$$

Où

ϵ_{fs} : dissipation de l'antenne en "Friss free space" (typiquement 10pJ/bit/m2)

ϵ_{amp} : dissipation de l'antenne en "Two-ray" propagation (typiquement 0.0015pJ/bit/m4).

d_0 : distance seuil pour choisir entre les deux modèles.

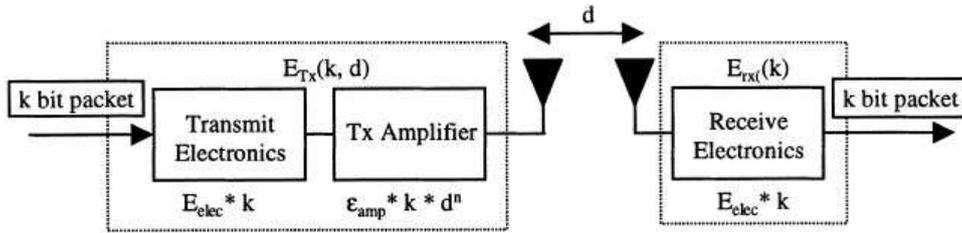


FIGURE 5.1 – Modèle de dissipation d'énergie radio [60]

Par ailleurs, l'énergie consommée sur un lien (i,j) dépend de la puissance de transmission de l'émetteur et de la puissance de réception au niveau du récepteur. C'est pourquoi, nous avons utilisé la formule 5.3, qui représente l'énergie nécessaire pour la transmission correcte d'un paquet à partir d'un nœud i à un nœud j [59].

$$E_{cij} = \frac{L * P_i}{T * P_c(\theta_{ij})} \quad (5.3)$$

L : longueur du paquet (bits) ;

P_i : Puissance de transmission (Watt) ;

T : Taux de transmission de données (bit/sec) ;

$P_c(\theta_{ij})$: Probabilité de réception correcte d'un paquet ;

θ_{ij} : représente le signal-to-interference ratio (SIR) du lien (i,j).

L'équation 5.3 dépend des caractéristiques concernant la transmission des données comme la modulation, le codage, la propagation radio et la structure du récepteur. Nous choisissons les mêmes modèles de transmission de données défini dans [59], où BER_{ij} représente le taux d'erreur binaire sur le lien (i,j).

$$P_c(\theta_{ij}) = (1 - 2 \text{BER}_{ij})^L \quad (5.4)$$

Cette contrainte est définie comme une exigence de la couche physique et est égale à 10^{-2} pour la voix et 10^{-4} pour les données.

5.3 Fonction objective pour le choix du prochain saut

Après avoir détaillé le concept de construction des chemins dans GM, notamment l'exploitation des chemins et leurs optimisation (sections 3.6) et les points forts qu'il apporte, à savoir : le contournement des trous statiques et la transmission sur multi-chemins en utilisant les plus courts chemins à nœuds disjoints. Nous introduisons dans cette section deux nouvelles métriques dans la décision de routage et lors de la transmission des données en temps réel. En effet, tel décrit précédemment, le nœud courant choisi dans son *ForwardingSet* le voisin le plus proche au sink en se basant uniquement sur la distance. Dans le cas d'une topologie fixe où aucun changement apparait dans le réseau, les chemins optimaux seront toujours utilisés, ce qui conduit à une surexploitation des nœuds capteurs constituant ses chemins par rapport à d'autres et un épuisement précoce de leurs batteries irremplaçables.

Dans notre solution, en plus de la distance euclidienne par rapport au sink, la fonction objectif du choix du prochain saut a été renforcée par les paramètres énergie et puissance de réception afin d'améliorer la manière dont le protocole construit les chemins. A cet effet, notre protocole de routage géographique multi-chemins devient multicritère dans le sens où la transmission des flux de données s'effectue sur des chemins qui combinent plusieurs contraintes.

Cette approche de routage multicritère fait appel dans la littérature à deux concepts largement répandus dans les réseaux de capteurs sans fil, relatifs aux problèmes d'optimisation dans la recherche opérationnelle, à savoir : chemin à contraintes multiples (*Multi-Constrained Path - MCP problem*), et chemin optimal à contraintes multiples (*Multi-Constrained Optimal Path - MCOP problem*). Le premier consiste à trouver le(s) chemin(s) qui satisfait(ont) les différentes contraintes, tandis que le deuxième a pour objectif de trouver le(s) chemin(s) qui optimise(nt) la fonction objective associée. Autrement dit, les problèmes MCOP sont les plus complexes car leurs solutions font partie de celles trouvées dans les problèmes de type MCP et l'inverse n'étant pas nécessairement vrai.

Le routage avec prise en charge de plusieurs paramètres permet donc de déterminer les chemins en fonction des disponibilités des ressources et des exigences des flux transportés. Au vu des métriques multiples appelées à être optimisées, cette exigence du routage devient un

problème NP-complet à résoudre dès qu'il s'agit d'optimiser au moins deux critères à la fois. Les techniques utilisées agissent souvent en deux étapes :

1. un ensemble de chemins potentiels est sélectionné au regard de la fonction objective à optimiser où plusieurs métriques statiques sont pris en compte.

$$f_{statique} = f(\text{bande passante, nombre de sauts, délai, ...etc})$$

2. le flux est distribué sur l'ensemble des chemins potentiels et le taux d'utilisation de chaque chemin est mis à jour en temps réel. Le coût de chaque chemin sélectionné dépend de l'évaluation des critères dynamiques tels que le le taux de perte de paquet, le délai réel, la gigue, l'énergie résiduelle..etc. Ceci exige également la définition d'une fonction objective basée sur des critères dynamiques qui reste toujours un problème d'optimisation multicritère.

$$f_{dynamique} = f(\text{taux de perte de paquets, délai mesuré, gigue, énergie résiduelle, ...etc})$$

Par ailleurs, certaines approche procèdent de manière ordonnancée et sont basées sur le classement par ordre d'importance des critères utilisés dans la fonction objective. Les chemins répondant au 1^{er} critère sont calculés, réduisant ainsi l'ensemble de tous les chemins potentiels puis, le 2^{ème} critère est appliqué à ce sous-ensemble et ainsi de suite.

Dans notre conception, nous proposons comme critère de choix, une métrique triple tenant compte à la fois de la distance du voisin par rapport au sink, de son énergie résiduelle et de sa puissance de réception sur le lien de transmission. Formellement, la nouvelle fonction objective est décrite ainsi :

$$f(i_j) = \alpha \left(\frac{D_i - D_j}{T_R} \right) + \beta \left(\frac{E_{R_j}}{E_{I_j}} \right) + \gamma P_{r_j} \quad (5.5)$$

D_i : Distance du nœud courant par rapport au sink;

D_j : Distance du voisin j par rapport au sink;

T_R : Portée de transmission (Transmission Range);

E_{R_j} : Energie résiduelle du voisin j.

E_{I_j} : Energie initiale du voisin j.

P_{r_j} : Puissance de réception du voisin j sur le lien(i,j);

(α, β et γ) : coefficients de pondération (entre 0 et 1) qui dépendent du type de l'application.

Avec la formule simplifiée de la puissance de réception :

$$P_{r_j} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4 \pi D_{ij}} \right)^2 P_{t_i} \quad (5.6)$$

P_{t_i} : Puissance délivrée à l'antenne d'émission ;

P_{r_j} : Puissance collectée sur l'antenne de réception ;

G_t, G_r : sont respectivement les gains linéaires de l'antenne d'émission et de réception ;

D : Distance séparant les deux nœuds

λ : Longueur d'onde correspondant à la fréquence de travail.

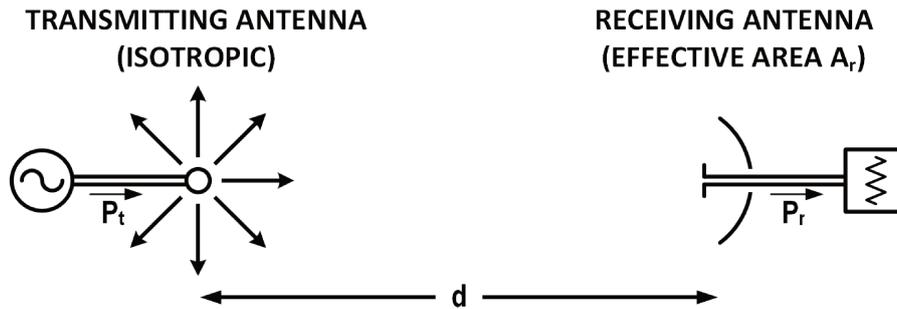


FIGURE 5.2 – Circuit radio de Friis [61]

L'équation de *Friis* 5.6 est couramment remplacée par son expression logarithmique en :

$$P_{r_j} = P_{t_i} + G_t - \alpha + G_r \quad (5.7)$$

Avec la perte de propagation $\alpha = -20 \text{ Log} \left(\frac{\lambda}{4 \pi D_{ij}} \right)$.

En espace libre, le terme d'affaiblissement α s'exprime par $\left(\frac{\lambda}{4 \pi l} \right)^2$ et si l'onde se réfléchit sur N obstacles lors de sa propagation (murs, bâtiments,..etc.), l'affaiblissement devient :

$$\left(\frac{\lambda}{4 \pi l} \right)^2 \left| 1 + \sum_{n=1}^N \Gamma_n \frac{l}{R_n} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_n - l)} \right|^2$$

Où Γ_n représente le coefficient de réflexion sur l'obstacle n et R_n la longueur du trajet n .

Cette modification de la fonction objective nous permet de :

- éviter la surexploitation des nœuds qui épuise les batteries et provoque les cassures des liens de communication ;
- équilibrer la charge dans le réseau, ce qui prolonge sa durée de vie ;
- filtrer les nœuds vulnérables avec une faible énergie résiduelle dès la construction des chemins ;
- augmenter la probabilité d'une réception correcte des paquets sans retransmission ;
- construire des chemins de routages fiables.

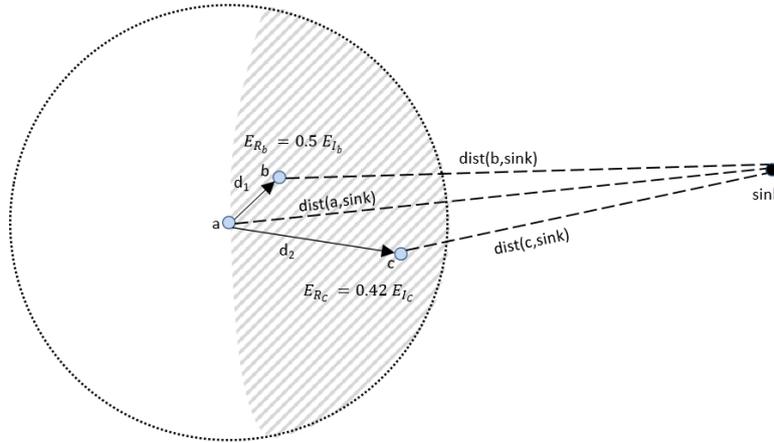
Exemple


FIGURE 5.3 – Exemple d'utilisation de la puissance de réception]

Dans l'exemple de la figure 5.3, le *ForwardingSet* du nœud a contient les nœuds $\{b, c\}$. Si le choix du prochain saut dans la fonction objective donnée dans la formule 5.5 se limite seulement à la distance, le nœud a choisira à chaque événement le nœud c en dépit de sa faible énergie résiduelle $[E_{R_c} = 42\% E_{I_c}]$, ce qui provoque l'épuisement précoce de sa batterie.

Le 2^{ème} argument de la fonction objective $\left[\beta \frac{E_{R_j}}{E_{I_j}}\right]$ prend en charge le rapport énergie résiduelle et énergie initiale avec le coefficient de pondération β afin d'alléger les nœuds apprenants aux chemins optimaux et équilibrer la charge dans le réseau.

Cependant, dans certains cas de figure, ces deux métriques ne suffisent pas à élire le nœud de prochain saut et le nœud courant choisira aléatoirement entre les nœuds potentiels.

Notons par $d1 = [dist(a, sink) - dist(b, sink)]$ et $d2 = [dist(a, sink) - dist(c, sink)]$ où dans l'exemple de la figure 5.3, ($d1=1m$ et $d2=3m$) et considérons une répartition équitable entre distance et énergie ($\alpha=\beta$) avec la portée de transmission ($T_R=25m$).

La fonction objective de a pour les deux nœuds (b, c) sans l'introduction du 3^{ème} argument relatif à la puissance de réception, se résume par :

$$\begin{cases} f(a_b) = \alpha \left(\frac{D1}{T_R}\right) + \beta \left(\frac{E_{R_b}}{E_{I_b}}\right) \\ f(a_c) = \alpha \left(\frac{D2}{T_R}\right) + \beta \left(\frac{E_{R_c}}{E_{I_c}}\right) \end{cases}$$

Le rapport des deux fonctions nous donne :

$$\frac{f(a_b)}{f(a_c)} = \frac{\alpha \frac{d1}{T_R} + \beta \frac{E_{R_b}}{E_{I_b}}}{\alpha \frac{d2}{T_R} + \beta \frac{E_{R_c}}{E_{I_c}}} = \frac{\alpha \frac{d1}{T_R} + \alpha \frac{0.5 E_{I_b}}{E_{I_b}}}{\alpha \frac{d2}{T_R} + \alpha \frac{0.42 E_{I_c}}{E_{I_c}}} = \frac{\frac{1}{25} + 0.5}{\frac{3}{25} + 0.42} = 1$$

Les puissances de réception des deux nœuds b et c sont respectivement :

$$\begin{cases} P_{r_b} = P_{t_i} + G_t + G_r + 20 \text{Log} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1} \right) = P_{t_i} + G_t + G_r + 20 \text{Log} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) - \text{Log}(d_1) \\ P_{r_c} = P_{t_i} + G_t + G_r + 20 \text{Log} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_2} \right) = P_{t_i} + G_t + G_r + 20 \text{Log} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) - \text{Log}(d_2) \end{cases}$$

$P_{t_i} + G_t + G_r + 20 \text{Log} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)$ représente une constante positive, qu'on notera $Const$

$$\begin{cases} P_{r_b} = Const - \text{Log}(d_1) = Const - \text{Log}(1) = Const \\ P_{r_c} = Const - \text{Log}(d_2) = Const - \text{Log}(3) \end{cases}$$

Comme $\text{Log}(3) > 0 \Rightarrow Const > Const - \text{Log}(3)$, ce qui donne $P_{r_b} > P_{r_c}$. Par conséquent, le nœud a sélectionne le nœud b comme successeur.

Nous avons introduit la puissance de réception dans la fonction objective du choix du prochain saut afin d'augmenter la précision lors de la sélection des nœuds de prochains saut et d'avoir une bonne réception des paquets sans retransmission. De plus, cette métrique nous renseigne sur les éventuelles niveaux d'interférences objet de notre prochain chapitre où les nœuds entourés de nœuds actifs auront un faible indice.

5.4 Modélisation théorique du Nombre de Paquets Perdus

A notre connaissance, tous les protocoles de routage géographique dotés (ou non) de mécanismes de tolérance aux pannes ne prennent pas en considération la formation des trous dynamiques dans le réseau, impliquant un ou plusieurs nœuds. En effet, la création d'un trou dynamique est causée par la rupture des liaisons de communication sans fil ou par l'arrêt des nœuds capteurs pendant la transmission des données en temps réel. En d'autres termes, les protocoles de routages hors-ligne étudiés dans la littérature ne tiennent pas compte du nombre de paquets perdus (NPP) qui pourra déformer et dégrader le contenu transmis.

Si un nœud $n_i \in N$, $n_i \in Ch_k$ avec $Ch_k \in CH$, tombe en panne pendant la transmission à l'instant T_{n_i} , tous les paquets qui ont emprunté ce chemin défectueux après T_{n_i} seront perdus. Nous définissons le NPP du nœud n_i comme suit :

$$NPP_{n_i}(t) = \frac{NPE}{N_{chemins}} \left(1 - \frac{T_{n_i}}{D_T} \right) + \alpha \quad (5.8)$$

NPE : Nombre de paquets envoyés;

$N_{chemins}$: Nombre de chemins;

T_{n_i} : Temps d'échec du nœud n_i ;

D_T : Durée totale de la transmission;

α : Nombre de paquets perdus dû aux erreurs de transmission.

A cet effet, dans le cas où le mode du transfert des paquets est effectué sur multi-chemins, la défaillance d'un nœud affecte uniquement le chemin qui le contient, d'où l'argument $\frac{NPE}{N_{chemins}}$.

D'autre part, la panne est fortement liée à un temps t , défini dans la formule 5.8 par T_{n_i} , du fait qu'elle survient en temps réel lors du routage des paquets. A titre d'exemple, si la panne se produit au milieu de la durée de transmission, la moitié des paquets à transférer sur le chemin défectueux seront perdus. $NPP_{n_i}(t) = \frac{NPE}{N_{chemins}} \left(1 - \frac{T_{n_i}}{D_T}\right) = \frac{NPE}{N_{chemins}} \left(1 - \frac{\frac{D_T}{2}}{D_T}\right) = \frac{NPE}{N_{chemins}} \left(\frac{1}{2}\right)$.

Dans le cas où deux nœuds $(n_i, n_j) \in N$ tombent en panne respectivement à T_{n_i} et T_{n_j} , deux cas de figures peuvent se présenter

1. si les deux nœuds appartiennent au même chemin, le $NPP_{(n_i, n_j)}$ est calculé sur la base du 1^{er} nœud en panne. En effet, la panne du 2^{ème} nœud n'affecte pas le chemin déjà défectueux.

$$\begin{cases} (n_i, n_j) \in Ch_k \\ NPP_{(n_i, n_j)}(t) = \frac{NPE}{N_{path}} \left(1 - \frac{Min(T_{n_i}, T_{n_j})}{D_T}\right) + \alpha \end{cases}$$

2. si les deux nœuds n'appartiennent pas au même chemin, le $NPP_{(n_i, n_j)}$ est calculé en additionnant $NPP_{(n_i)}$ et $NPP_{(n_j)}$, formellement le $NPP_{(n_i, n_j)}$ est calculé comme suit :

$$\begin{cases} n_i \in Ch_k \text{ et } n_j \in Ch_m \text{ avec } (Ch_k, Ch_m) \in CH \\ NPP_{(n_i, n_j)}(t) = \left[\frac{NPE}{N_{chemins}} \left(1 - \frac{T_{n_i}}{D_T}\right) + \alpha 1 \right] + \left[\frac{NPE}{N_{chemins}} \left(1 - \frac{T_{n_j}}{D_T}\right) + \alpha 2 \right] = \frac{NPE}{N_{chemins}} \left(2 - \frac{T_{n_i} + T_{n_j}}{D_T}\right) + \alpha \end{cases}$$

D'une manière générale, nous obtenons pour un nombre N de nœuds en pannes (np)

$$NPP_{(n_1, \dots, n_{np})}(t) = \frac{NPE}{N_{chemins}} \left(N_{np} - \frac{\sum_{i=1}^{np} T_{n_i}}{D_T} \right) + \alpha \quad (5.9)$$

Exemple

L'exemple de la figure 5.4 clarifie le nombre de paquets perdus (NPP) définie dans la formule 5.9. Suite à une détection d'un événement, la source envoie 900 paquets de données en divisant le flux équitablement sur les 3 chemins construits.

Au bout d'un certain temps de transmission de données sur le 1^{er} chemin de routage, le nœud n_i tombe en panne. Le temps de défaillance T_{n_i} du nœud n_i correspond dans cet exemple au quart de la durée de transmission ($T_{n_i} = \frac{D_T}{4}$). Cette panne précoce provoque la perte de 225 paquets. De la même logique, sur le 3^{ème} chemin, le nœud n_j s'éteint à l'instant $T_{n_j} = \frac{D_T}{2}$, engendrant la perte de 150 paquets.

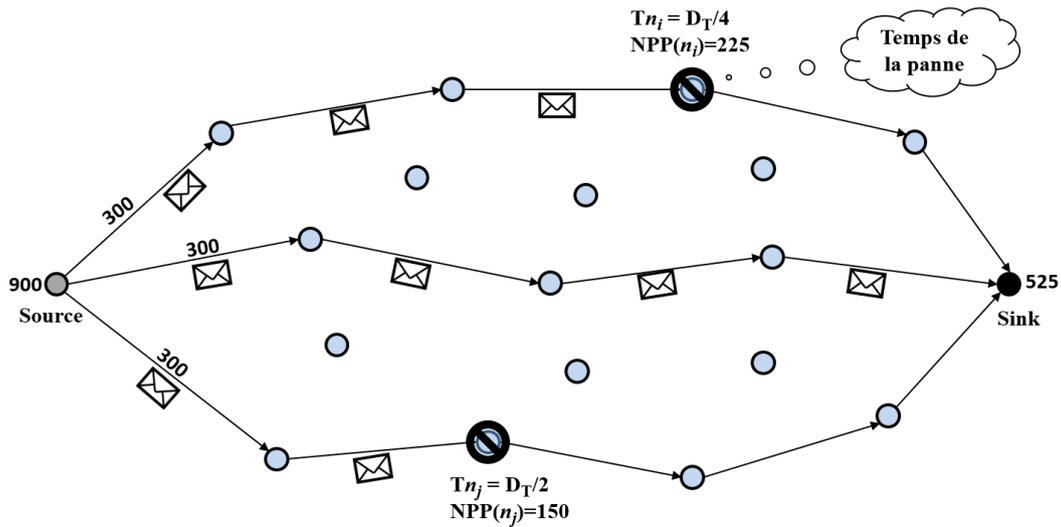


FIGURE 5.4 – Nombre de paquets perdus (NPP)

A cet effet, le NPP de l'événement capturé par la source est égale à la somme des paquets perdus sur chaque chemin, d'où $NPP(n_i, n_j) = NPP(n_i) + NPP(n_j) = 225 + 150 = 375$ et par conséquent, le nombre de paquets reçus (NPR) = $NPE - NPP = 900 - 375 = 525$.

5.5 Mécanisme de réparation

Le mécanisme curatif de tolérance aux pannes FCM (*Faulty-paths Curative Mechanism*) intervient en cas de panne ou rupture soudaine d'un lien de communication entre deux nœuds capteurs au cours de la transmission de données en temps réel, et ce pour diverses raisons (décharge brusque d'énergie, défaillance matérielle, vol ou écrasement...etc).

En se basant sur les limites du routage géographique hors ligne où l'exploration de chemins s'effectue avant le transfert des données. Les routes construites ne reflètent pas forcément la topologie du réseau en cas de mobilité ou de panne, durant la phase de transmission. En effet, cette phase est souvent négligée dans la conception des protocoles de routages dans les réseaux de capteurs.

A cet effet, notre réflexion pour pallier à cette contrainte, réside dans le fait où le prédécesseur du nœud défaillant, réalise l'absence de son successeur, au cours de la transmission des données, en ne recevant plus les acquittements successifs après un certain nombre d'envois tel définie dans la formule 5.10.

Dans notre conception, le nombre de paquets perdus est totalement indépendant aux temps de défaillances et aux chemins contenant les nœuds en panne. Cela peut être modélisé comme suit :

$$NPP = n_i N_{np} + \beta \quad (5.10)$$

n_i : Nombre d'itération nécessaire avant le déclenchement du mécanisme ;

β : Nombre de paquets perdus dû aux erreurs de transmission.

5.5.1 Messages utilisés

Du moment que la phase d'exploration de chemins décrite précédemment dans la section 3.6.1 est concernée par notre mécanisme, nous lui avons ajouté le deux champs du tableau 5.1. En revanche, les autres messages du GM restent inchangés.

TABLEAU 5.1 – Champs ajoutés au message d'exploration de chemins

<i>RequêteMaintenance</i>	<i>ÉtiquetteMaintenance</i>
1 octet	2 octets

Le 1^{er} champ *RequêteMaintenance* nous renseigne sur la nature de la requête d'exploration de chemins à utilisé : est-ce une requête qui relève de la 1^{ère} phase d'exploration de chemins, ou bien une requête de réparation de chemin suite à une cassure de lien ?

Dans le cas d'une demande de réparation, cette dernière s'arrête au premier nœud de jonction avec une valeur d'étiquette inférieure à *ÉtiquetteMaintenance*. Le 2^{ème} champ *ÉtiquetteMaintenance* sert à véhiculer l'étiquette du nœud défaillant.

De ce fait, deux nouveaux types de messages de signalisation ont été introduits lors du routage des paquets de données, à savoir :

1. **Message de blocage** : envoyé à la source pour arrêter la transmission sur le chemin défectueux ;
2. **Message de rétablissement** : envoyé également à la source après l'établissement du chemin défaillant, afin de rétablir le transfert vers le nouveau chemin construit.

5.5.2 Déroulement

En cas de défaillance soudaine dans le réseau, le prédécesseur du nœud en panne entreprend parallèlement les actions suivante : (1) envoie un message de blocage à la source pour stopper le transfert de données sur le chemin défectueux et (2) lance une nouvelle phase de construction de chemin en envoyant une expédition gloutonne de type maintenance à son voisin non-actif de prochain saut comme illustré dans la figure 5.5.

Lors de la réception du message de blocage par la source, cette dernière (1) bloque immédiatement l'envoi sur le chemin en rupture et (2) distribue équitablement le flux sur les chemins opérationnels restants, pour assurer la continuité de la transmission du flux de données.

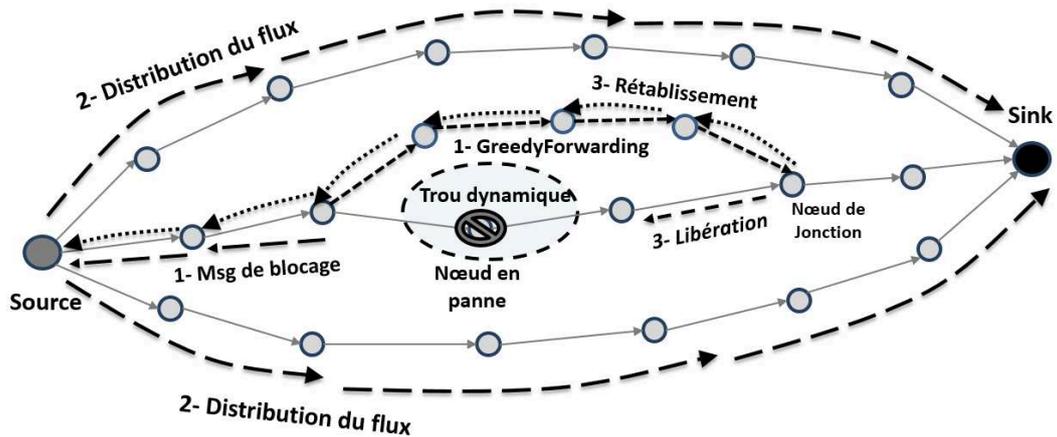


FIGURE 5.5 – Déroulement du mécanisme de réparation

Cependant, la découverte de chemin explorée par le prédécesseur du nœud en panne est similaire à celle détaillée dans la section 3.6.1, mais qui s’arrête, dans la mesure du possible, dès la rencontre d’un nœud de jonction appartenant à l’ancien chemin en rupture, et dont la distance au sink est plus proche que celle du nœud en panne.

En cas de réponse positive du nœud de jonction, ce dernier (1) envoie un message de rétablissement à son nouveau prédécesseur optimisé et ainsi de suite jusqu’à la source et (2) envoie un message de libération à son prédécesseur afin de le libérer pour qu’il puisse participer à la construction d’autres chemins

Une fois la source reçoit le message de rétablissement, elle répartie à nouveau instantanément et sans interruption le flux sur l’ensemble des chemins construits. Cela permet de maintenir la connectivité du réseau et :

- éviter les pertes précoces de paquets en bloquant les chemins défectueux, afin d’assurer la fiabilité des données transmises et d’augmenter le taux de délivrance;
- réparer localement les chemins en rupture sans avoir à reconstruire des nouveaux chemins de la source vers le sink, ce qui réduit positivement le délais de transmission de bout-en-bout;
- renforcer la bande passante de transmission en préservant les chemins opérationnels;
- basculer dynamiquement entre les chemins de routage en cas de défaillance ou lors du rétablissement des liens sans interrompre la continuité du transfert du flux multimédia;

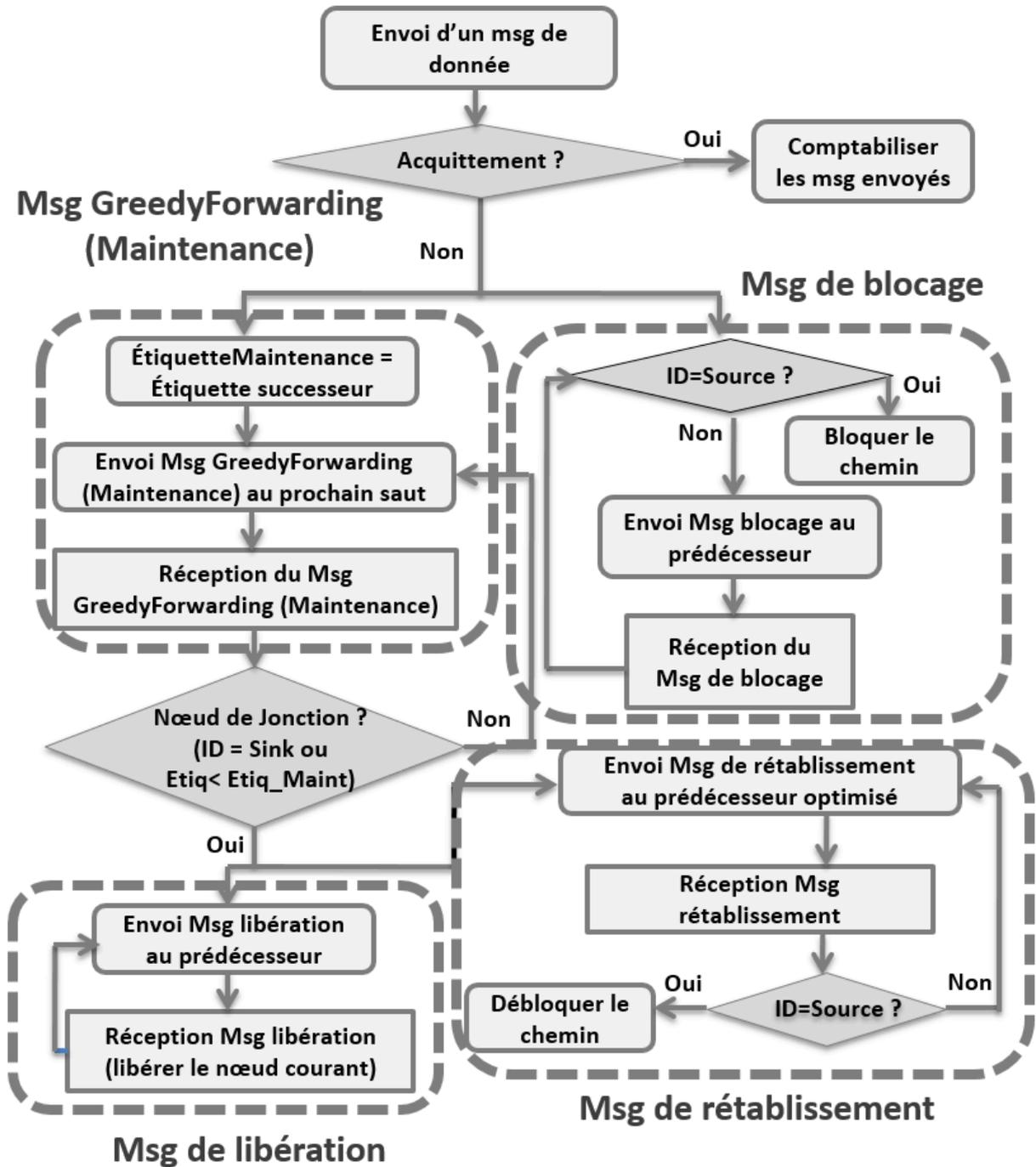


FIGURE 5.6 – Diagramme du mécanisme de réparation

5.6 Mécanisme de prévention

Le flux de média continu est généralement caractérisé par une longue durée et une consommation drastique, les capteurs sont très susceptibles d'épuiser leurs réserves énergétique pendant la transmission des données en temps réel. C'est pourquoi, nous avons conçu le mécanisme préventif de tolérance de pannes EPM (*Energy-efficient Preventive Mechanism*) en plus de la métrique d'énergie utilisée dans la construction des chemins. Le but étant de détecter les capteurs à court d'énergie résiduelle durant le transfert du flux et les contourner d'une manière dynamique en temps réel sans interrompre la continuité de la livraison des données.

5.6.1 Messages utilisés

Etant donnée que l'énergie résiduelle des nœuds voisins est transmise périodiquement via le grand cycle des messages de balisage, nous avons ajouté à la structure de ce dernier le champ *EnergieRésiduelle*, tel que montré dans le tableau 5.2.

TABLEAU 5.2 – nouveau format du message de balisage

Coordonnée X	Coordonnée Y	EtatNœud	EnergieRésiduelle
4 octets	4 octets	1 octet	4 octets

Par ailleurs, deux nouveaux types de messages d'indication ont été ajoutés dans la phase de transmission de données, à savoir :

1. **Message d'alerte** : envoyé par le nœud vulnérable à son prédécesseur pour lui faire part de son seuil d'énergie critique;
2. **Message de basculement** : envoyé par le nœud de jonction au prédécesseur du nœud vulnérable afin de basculer vers le nouveau chemin.

5.6.2 Déroulement

Dès que l'énergie résiduelle d'un nœud capteur atteint un seuil critique, comme illustré sur la figure 5.7, il envoie un message d'alerte à son prédécesseur pour l'informer de son état d'énergie critique. A la réception du message d'alerte, le prédécesseur du nœud vulnérable dénommé par (PNV), (1) poursuit le transfert des paquets de données contrairement au mécanisme de réparation et (2) entreprend une phase d'exploration de type maintenance similaire à celle décrite précédemment, mais sans envoyer le message de blocage à la source, permettant ainsi la continuité de la transmission avec une bande passante élevée et la construction du chemin alternatif au même temps.

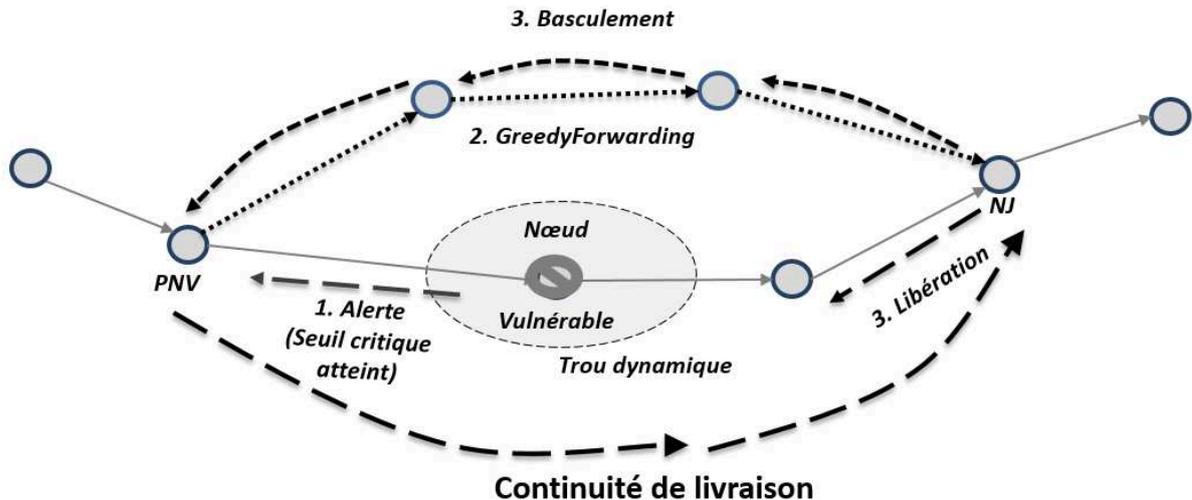


FIGURE 5.7 – Déroulement du mécanisme de prévention

En cas de réponse positive du nœud de jonction (NJ) rencontré par le transfert gourmand de maintenance. Ce dernier (1) envoie un message de libération à son prédécesseur afin qu'il puisse participer à la construction d'autres chemins et (2) envoie un message de basculement à son nouveau prédécesseur optimisé, et ainsi de suite jusqu'au prédécesseur du nœud vulnérable.

Une fois que le PNV reçoit le message de mise à jour, il bascule dynamiquement la progression sur le nouveau chemin, sachant que les autres chemins opérationnels poursuivent leurs transmissions de données sans interruption.

Nous remarquons que les messages de blocage et de rétablissent (depuis la source) ne sont pas utilisés dans le mécanisme de prévention. En effet, cette stratégie permet de switcher instantanément entre les chemins de routage sans interrompre le flux multimédia continu et sans avoir à reconstruire un nouveau chemin de la source vers le sink, ce qui réduit positivement le délai de transmission de bout-en-bout.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté nos contributions de tolérance aux pannes pour la transmission des flux multimédia dans les réseaux de capteur sans fil.

A cet effet, nous avons définie une fonction objective multicritères pour la sélection du prochain saut et nous avons modélisé le nombre de paquets perdus lors du transfert des données en temps réel.

Par la suite, nous avons détaillé nos mécanismes de réparation et de prévention relatifs respectivement aux pannes soudaines et décharges totales des batteries. En effet, les deux mé-

canismes tolérants aux pannes implémentés au niveau de GM nous permettent d'assurer la fiabilité des données transmises et d'avoir un bon équilibrage de charge dans le réseau tout en maintenant sa connectivité. Notons par *Geographic Multipath Fault Tolerant (GMFT)* la nouvelle version de notre protocole de routage décrit dans le chapitre 3.

Dans le prochain chapitre, nous abordons la problématique de l'interférence durant la progression des paquets de données sur plusieurs chemins adjacents. C'est pourquoi nous définissons dans un premier temps un modèle d'interférence, puis nous proposons notre mécanisme de chemins non-interférents afin de limiter les collisions et améliorer ainsi le taux de délivrance des paquets. Par la suite, nous présentons le modèle de perte de chemins où nous calculons la probabilité d'erreur dans un environnement multi-paires (source,sink), basé sur la distance d'interférence. Enfin, nous introduisons une nouvelle métrique dans la fonction objective, relative à la somme des interférences des nœud actifs qui entourent les nœuds du *ForwardingSet* du nœud courant pour gérer les transferts simultanés croisés.

Troisième partie

Les interférences dans les Réseaux de Capteurs Multimédia Sans Fil (RCMSF)

Chapitre 6

Modèles, mécanisme et métrique pour la gestion des interférences

Sommaire

6.1 Introduction	91
6.2 Modèle d'interférence	92
6.3 Une paire (source,sink) dans le réseau	93
6.3.1 Mécanisme de chemins non-interférents	93
6.4 Multiples paires (source,sink)	96
6.4.1 Modèle de perte de chemin	96
6.4.2 Probabilité d'erreur	99
6.5 Conclusion	101

6.1 Introduction

Les applications potentielles des réseaux de capteurs multimédia couvrent un large spectre allant du militaire à l'industriel, du commercial au suivi environnemental. Ces applications exigent une bande passante élevée et sont extrêmement sensibles aux délais. Cependant, le routage par trajets multiples est l'une des solutions appropriées, contrairement aux schémas traditionnels employant les plus courts chemins.

En effet, la transmission sur multi-chemins consiste à construire plusieurs routes entre la paire (source, sink) tel mentionné dans la section 2.5 et en envoyant uniformément les paquets de données via ces multiples trajets afin de :

- équilibrer la charge entre les nœuds, ce qui prolonge leur durée de vie et celle du réseau;
- améliorer le taux d'utilisation des canaux;
- réduire les délais de transmission;
- tolérer les éventuelles pannes et augmenter le niveau de sécurité.

En revanche, afin d'avoir une haute efficacité, nous devons prendre en considération les caractéristiques et contraintes des transmissions des nœuds capteurs, notamment le phénomène d'interférence dans les environnements sans fil CSMA/CA. En effet, l'interférence résulte généralement de la proximité géographique des chemins comme illustré dans la figure 6.1 où le nœud m qui se trouve dans le rayon de transmission du nœud j interfère sur la réception/transmission de ce dernier et provoque les collisions des paquets de données, réduisant ainsi le taux de fiabilité du protocole de routage utilisé.

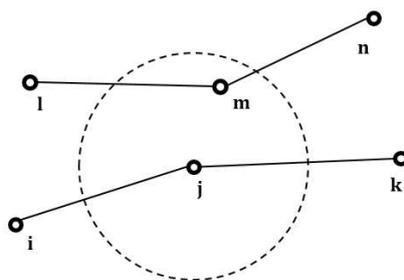


FIGURE 6.1 – Exemple du phénomène d'interférence

Sur la base de ces considérations, nous introduisons dans ce chapitre un nouveau schéma relatif au modèle d'interférence dans les RCMSF et un nouveau mécanisme nommé NMM (*Non-interfering Multipath Mechanism*). Ce dernier intervient lors de la phase d'exploration des chemins, afin de limiter les interactions entre les routes adjacentes et améliorer ainsi le taux de délivrance des paquets de données. Par la suite, nous nous intéresserons aux transmissions multiples dans le réseau où plusieurs paires (source, sink) transmettent en même temps.

Nous définissons dans ce contexte, le modèle de perte de chemin et nous introduisons une nouvelle métrique relative aux interférences dans la fonction objective avec identification par simulation du coefficient de probabilité d'erreur. Le protocole de routage résultant est baptisé GNMFT pour (*Geographic Non-interfering Multipath Fault Tolerant*).

6.2 Modèle d'interférence

Basé sur le modèle du réseau et les hypothèses de conception de la section 3.4, nous introduisons dans ce chapitre, le fait que chaque nœud n_i , est équipé d'une radio avec une portée de transmission T_i supposée circulaire (chaque nœud a le même rayon) et une portée d'interférence I_i potentiellement plus grande ($I_i > T_i$).

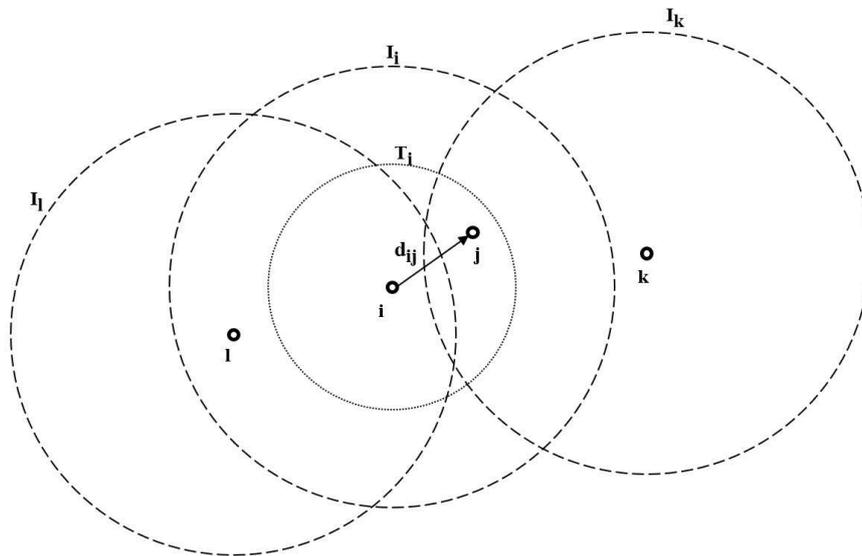


FIGURE 6.2 – Modèle d'interférence

Notons par $T_i(t)$ et $R_i(t)$ les instants t où le nœud n_i respectivement transmet ou reçoit les trames de données et par d_{ij} la distance entre les nœuds n_i et n_j de la figure 6.2. Rappelons également qu'en utilisant un seul canal sans fil, chaque nœud ne peut pas envoyer et recevoir, ni transmettre à plus d'un nœud en même temps. Cependant, le nœud n_j reçoit avec succès les paquets de données envoyés par le nœud n_i , si les conditions suivantes sont satisfaites :

1. $d_{ij} \leq T_i$
2. Tout nœud n_k tel que $n_j \in I_k$, ne transmet pas et ne reçoit pas quand n_j reçoit.

Par ailleurs, comme nous pouvons calculer la puissance de réception P_{r_j} , au niveau du récepteur n_j comme indiqué dans la formule 5.6 et sa version logarithmique 5.7, une transmission réussit si le $SNR_{ij} \geq SNR_{seuil}$ où SNR_{ij} de la formule 6.1, désigne le rapport du signal de bruit (*Signal-to-Noise Ratio*) sur le nœud n_j pour les transmissions reçues du nœud n_i .

$$\text{SNR}_{ij} = P_{ij} - N_j - \sum_{k=1}^n P_{jk} \quad (6.1)$$

Le bruit total N_j est constitué du bruit ambiant N_a et les interférences dues aux autres transmissions en cours dans le réseau. A cet effet, la détection de porteuse physique (*Physical Carrier Sensing*) est utilisée pour que l'expéditeur n_i tente de détecter toute communication en cours avant de commencer à transmettre. Cela signifie que l'interférence de l'émetteur I_i doit également être hors de portée des autres transmissions, ce qui rajoute une 3^{ème} contrainte.

3. Tout nœud n_l tel que $n_l \in I_i$, ne transmet pas et ne reçoit pas quand n_i transmet.

Dans ce contexte, transmettre efficacement entre chaque paire de nœuds (i,j) sans perte, ni collision de paquets de données, revient à minimiser les interférences des nœuds adjacents à cette paire. Cela est formulé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \sum I_i / n_i \rightarrow n_j \\ d_{ij} \leq T_i \\ \forall n_k \in N / n_j \in I_k \quad R_j(t) \not\equiv (T_k(t) \wedge R_k(t)) \\ \forall n_l \in N / n_l \in I_i \quad T_i(t) \not\equiv (T_l(t) \wedge R_l(t)) \end{array} \right.$$

6.3 Une paire (source,sink) dans le réseau

Les nœuds capteurs sont déployés dans des zones d'intérêts pour diverses raisons où les détections d'évènements peuvent surgir soit simultanément ou alternativement dans des intervalles de temps. Considérons dans cette section, le cas où à un instant t un seul flux de données est véhiculé dans le réseau, sur multi-chemins entre une paire (source,sink) et un ensemble de nœuds intermédiaires.

En plus de l'approche de routage hybride utilisée, la fonction objective du choix de prochain saut (distance euclidienne, énergie résiduelle et puissance de réception) et les mécanismes de tolérants aux pannes implémentés, nous introduisons dans ce qui suit, un nouveau mécanisme relatif à la sélection de chemins non-interférents lors de la phase de construction décrite dans la section 3.6. Le but étant de limiter les interactions entre les routes adjacentes et améliorer ainsi le taux de délivrance des paquets de données

6.3.1 Mécanisme de chemins non-interférents

Description

Pendant la phase de construction des chemins, notre mécanisme de chemins non-interférents NMM (*Non-interfering Multipath Mechanism*) essaye de trouver le maximum de routes à nœuds disjoints en minimisant autant que possible les interférences entre ces trajets adjacents.

En effet, les chemins à nœuds disjoints tel décrit dans la section 2.5.1, ne partagent aucun nœud commun et présentent un intérêt particulier du fait qu'ils empêchent que certains nœuds transmettent plus de paquets que d'autres et évitent la rupture de plusieurs chemins à la fois. De plus, dans la communication sans fil, la bande passante est partagée entre les nœuds voisins où un nœud peut interférer avec les nœuds géographiquement proches, dégradant ainsi le débit de livraison.

A cet effet, un nœud qui se trouve à un saut à partir d'un chemin déjà construit comme le montre la figure 6.3, a la priorité la plus faible en tant que nœud candidat à la construction d'autres chemins de routage. Ce type de nœud est appelé *nœud interférant* et ne sera pas choisi durant le processus d'exploration.

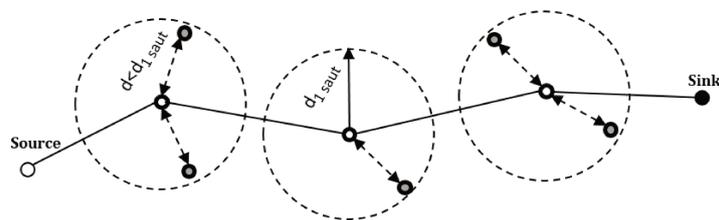


FIGURE 6.3 – Nœuds interférents à un saut d'un chemin construit

Cependant, le mécanisme proposé garantit que la plupart des nœuds appartenant aux chemins de routage opérationnels entre la source et le sink sont distants d'au moins deux sauts, ce qui réduira logiquement la perte de données due aux collisions.

Messages et fonction utilisés

Notre mécanisme est basé sur l'identification des nœuds interférents. Pour ce faire, nous avons utilisé la fonctionnalité de sur-écoute présenté précédemment dans la section 3.7 et deux nouveaux messages en complément à notre protocole GMFT.

1. **Sur-écoute des messages d'optimisation** : cette fonction nous permet d'identifier les nœuds qui se situent à un saut d'un chemin de routage. Cela se fait, suite à la sur-écoute par le nœud non concerné du message d'optimisation, envoyé ou reçu par un nœud actif appartenant au chemin construit. En effet, en partageant un médium sans fil, les données transmises par un nœud peuvent atteindre d'autres nœuds qui sont soit dans la portée de transmission de l'émetteur ou du récepteur.
2. **Message d'alerte interférence** : dès qu'un nœud interférant s'identifie, il diffuse un message d'alerte interférence à son *Neighborset* pour les informer qu'il se trouvent à un saut d'un chemin de routage. A la réception de ce message, les nœuds voisins mettent à jour

leurs tables de voisinage en marquant ce nœud interférant. A cet effet, le champ booléen *NœudInterférant* a été ajouté à la structure de la table de voisinage décrite auparavant dans le tableau 3.2.

3. **Message de fin d'interférence** : Ce message est diffusé également par le nœud interférant à son *Neighborset* dès la fin de la transmission, pour le débloquent des tables de voisinage afin qu'il puisse participer à la prochaine construction de chemins.

Les messages *WarningInterference* et *EndInterference* diffusés par le nœud interférant sont ajoutés comme nouveaux types au format du message de contrôle utilisé pendant la phase d'exploration de chemins et qui comprenait déjà : *GreedyForwarding*, *WalkingBack*, *Optimization* et *Liberation*.

Notons que le sink ne traite pas les messages *WarningInterference* envoyés par les nœuds interférents du fait qu'il n'est pas concerné par la phase de découverte *GreedyForwarding*. Cela qui minimise l'envoi de messages de contrôle inutiles et garantit une convergence rapide des chemins de routage construits.

Dans le cas où le nœud interférant est voisin de plusieurs chemins de routage, un compteur est utilisé pour incrémenter le nombre de ses trajets adjacents. A la fin de la transmission de données sur les différentes routes voisines du nœud interférant, ce dernier décrémente son compteur à chaque sur-écoute d'un message de libération. Lorsque le compteur est remis à zéro, le nœud interférant diffuse le message *EndInterference* à son *Neighborset*.

Déroulement

Dans l'exemple de la figure 6.4, le premier chemin exploité reliant la *source* au *sink* est $ch1 = \{source, a, b, c, sink\}$. Durant la phase d'optimisation de ce chemin, le *sink* envoie un message *Optimization* au nœud *c*, qui le transmet à son tour au nœud *b* et de ce dernier au nœud *a*. Le nœud *f* qui se trouve dans la portée de transmission de *c* écoute la requête d'optimisation et conclut qu'il se trouve à un saut d'un chemin de routage en cours de construction via sa distance qui est inférieure la distance d'un saut ($d_{fc} < d_{1saut}$). Les nœuds *e* et *d* réalisent également qu'ils sont à un saut du 1^{er} chemin.

Ainsi, les nœuds interférents (*d,e,f*) diffusent le message *AlertInterference* pour annoncer cette information à leurs voisins, en l'occurrence (*j,k*) pour le nœud *f*, (*h,i,j*) pour le nœud *e* et (*source,g,h*) pour le nœud *d*. Ces voisins les mettent dans leurs tables de voisinages comme étant nœuds interférents.

Les autres nœuds actifs (*a,b,c*) reçoivent pareillement le message d'alerte mais ne sont pas concernés par la construction du 2^{ème} chemin.

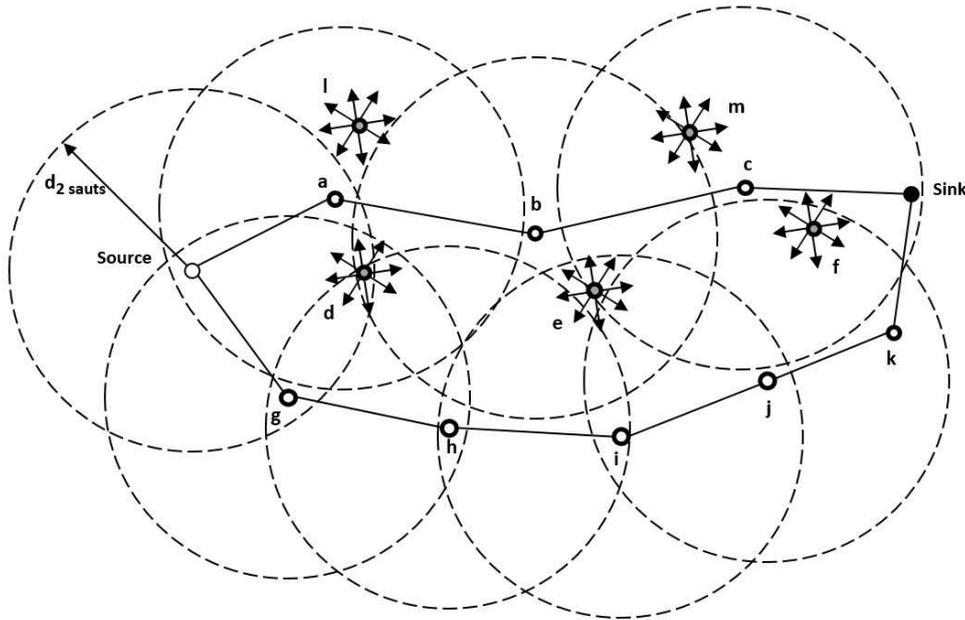


FIGURE 6.4 – Chemins non-interferents

Pendant la construction du 2^{ème} chemin de routage, la *source* ne choisit pas le nœud *d* comme prochain saut, malgré qu'il est plus proche du *sink* que le nœud *g*. En effet, le nœud *d* est marqué comme nœud interférant et par conséquent la *source* désigne le nœud *g* comme prochain saut. De la même logique, le nœud *j* sélectionne le nœud *k* au lieu du nœud *f*.

A cet effet, le 2^{ème} chemin construit est $ch2 = \{source, g, h, i, j, k, sink\}$. Nous constatons que les deux chemins de routage construits entre la *source* et le *sink* sont disjoints et leurs nœuds sont distants de deux sauts.

6.4 Multiples paires (source,sink)

Après avoir présenté notre solution, relative à la construction de chemins éloignés d'au moins deux sauts quand un seul flux de données est transmis dans le réseau. Nous abordons dans cette section les transmission multiples en même temps, provenant de plusieurs sources vers plusieurs sinks comme détaillé dans la section 3.7.

Pour ce faire, une nouvelle métrique a été introduite dans la fonction objective du choix de prochain saut, relative à la somme des interférences des nœud actifs qui entourent les nœuds du *ForwardingSet* du nœud courant.

6.4.1 Modèle de perte de chemin

Supposons le scénario illustré dans la figure 6.5 où le nœud *p* veut envoyer des informations au nœud *q*. Comme ce dernier reçoit les interférences des ses voisins actifs, peut ne pas recevoir

correctement les paquets envoyés par le nœud p . En effet, le nœud q reçoit la puissance de p mais également des $i_{\text{ème}}$ nœuds interférents qui l'entourent. La puissance reçue au nœud q à partir du nœud i dont la distance qui les sépare d_{qi} , est donnée par le modèle de perte de chemin suivant :

$$P_{qi}^{dB} = P_i^{dB} - 10\gamma \log_{10}(d_{qi}/d_0) + \eta_{qi}^{dB}, \quad (6.2)$$

où P_i^{dB} est la puissance en dB du $i_{\text{ème}}$ émetteur. Le second terme représente la puissance de perte de chemin après la propagation du signal à travers la distance d_{qi} avec d_0 comme distance de référence et γ coefficient de perte de chemin (typiquement entre 2 et 4). Le dernier argument concerne le bruit gaussien.

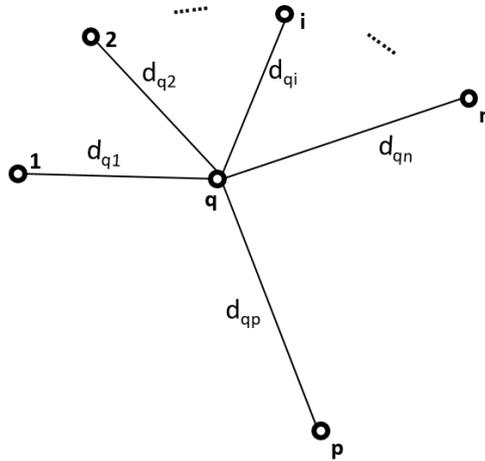


FIGURE 6.5 – Puissance du signal et interférence des voisins quand le nœud p envoie au nœud q

Nous considérons le cas où le canal est affecté par diverses sources de bruits avec une distribution normale logarithmique représentée par un signal de puissance avec une distribution normale de moyenne nulle ($\eta_{qi}^{dB} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{qi}^2)$), où l'écart-type σ_{qi} est compris entre 1 et 3 dB.

De la formule 6.2, la puissance du signal reçu dans le nœud q à partir du nœud p est :

$$P_{qp}^{dB} = P_q^{dB} - 10\gamma \log_{10}(d_{qp}/d_0) + \eta_{qp}^{dB}. \quad (6.3)$$

où P_q^{dB} représente la puissance du signal d'interférence reçu dans le nœud q à partir de ses voisins actifs (A_{ci}) et donnée par :

$$P_q^{dB} = \sum_{i \neq p}^{A_{ci}} P_{qi}^{dB}. \quad (6.4)$$

Par ailleurs, rappelons que le rapport du signal de bruit dû au canal qp est donné par :

$$\text{SNR}_{qp}^{dB} = \overline{\text{SNR}}_{qp}^{dB} + \eta_q^{dB} \quad (6.5)$$

où

$$\eta_q^{dB} = \eta_{qp}^{dB} - \eta_{qi}^{dB}, \quad (6.6)$$

$$\overline{\text{SNR}}_{qp} = P_s^{dB} - P_n^{dB}, \quad (6.7)$$

$$P_s^{dB} = P_q^{dB} - 10\gamma \log_{10}(d_{qp}), \quad (6.8)$$

$$P_n^{dB} = \sum_i^{M_i} (P_{qi}^{dB} - 10\gamma \log_{10}(d_{qi})) - N_q^{dB}, \quad (6.9)$$

P_s est la puissance du signal et P_n est la puissance du bruit;

Le bruit gaussien η_q a la variance $\sigma_q^2 = \sigma_{qp}^2 + \sum_i^{M_i} \sigma_{qi}^2$

N_q^{dB} représente le bruit totale au nœud q .

De ce qui précède, chaque nœud est en mesure de recevoir la somme des interférences de ses voisins actifs. Pour ce faire, le nœud courant diffuse une requête de bruit (*NoisyRequest*) à son *ForwardingSet* et calcule dès la réception des requêtes de réponses (*ResponseNoisy*) le voisin qui a le moins d'interférence. La nouvelle fonction objective, décrite dans la section 5.3, est définie ainsi :

$$f(i)_j = \alpha \left(\frac{D_i - D_j}{T_R} \right) + \beta \left(\frac{E_{R_j}}{E_{I_j}} \right) + \gamma P_{r_j} + \delta \text{SNR}_{ij}^{dB} \quad (6.10)$$

De plus, le concept de capacité de canal été utilisé dans le sens où si une source envoie n messages par seconde avec l'entropie d'un message H bits/message. Le taux d'information délivrée est $R = nH$ b/s. Le théorème de *Shannon* indique que (1) un canal bruité a une capacité maximal C , connu sous le nom de capacité de canal (2) si le taux d'information transmise $R < C$, on peut alors approcher des probabilités d'erreur arbitrairement faibles en utilisant des techniques de codage intelligents. Cela signifie que, théoriquement, il est possible de transmettre des informations presque sans erreur à tout moment en dessous d'un taux limite C . L'inverse est également important ($R > C$) où la probabilité d'erreur arbitrairement faible n'est pas réalisable. Tous les codes auront une probabilité d'erreur supérieure à un certain niveau minimal et par conséquent, il n'est pas possible de garantir que les informations soient transmises de manière fiable. Le théorème ne traite pas la situation rare dans laquelle le débit et la capacité sont égaux.

Le concept de capacité de canal montre clairement que le message est correctement reçu entre les nœuds p et q quand $R_{qp} < C_{qp}$, autrement le message est perdu ($R_{qp} > C_{qp}$).

Pour les canaux gaussiens, la capacité est donnée en bits d'information par seconde par :

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (6.11)$$

où B est la bande passante du canal et SNR est le rapport du signal de bruit au récepteur. Notons

que SNR n'est pas en dB et considérons le cas général sans perte ($B = \log_2$), la capacité dévient :

$$C_{qp} = \ln(1 + \text{SNR}_{qp}) \quad (6.12)$$

6.4.2 Probabilité d'erreur

Le canal radio est caractérisé par un changement rapide, typiquement un certain seuil minimum de signal est nécessaire pour des performances de communication acceptables où le signal reçu subira des périodes d'intensité suffisante/insuffisante dans des intervalles de temps. Le SNR au niveau du nœud récepteur suit une distribution normale comme indiqué sur la figure 6.6.

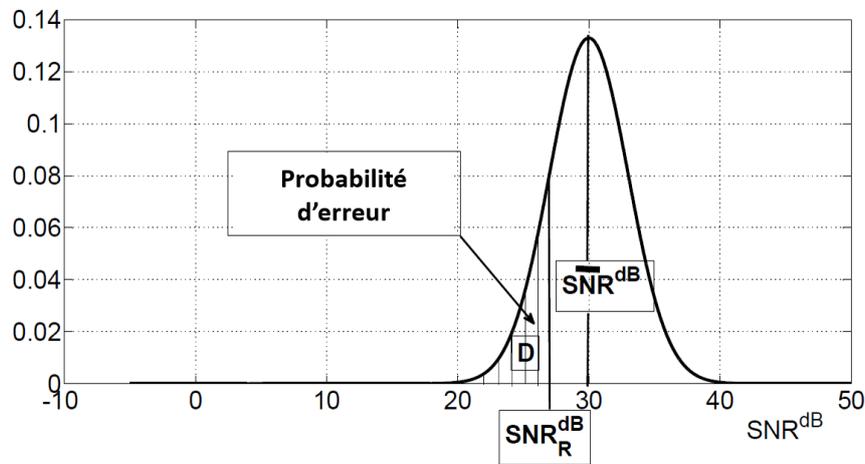


FIGURE 6.6 – Fonction de densité de probabilité de $\text{SNR}_{pq}^{\text{dB}}$

La zone $D = \{\text{SNR}^{\text{dB}} \mid \text{SNR}^{\text{dB}} < \text{SNR}_R^{\text{dB}}\}$, représente la probabilité de perte de l'information.

Le but de cette section est de déterminé la distance seuil d'interférence et le coefficient de perte de chemins γ . A cet effet, nous avons utilisé un seul chemin de routage pour chaque flux et écarté les deux flux par les distances : 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m et 40m (figure 6.7).

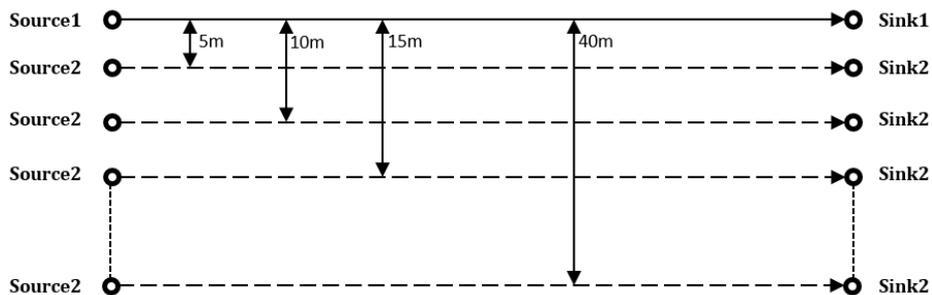


FIGURE 6.7 – Définition de la distance seuil d'interférence

La probabilité qu'un message soit reçu par un nœud est donnée par la fonction de distri-

bution cumulative normale, évaluée à SNR_{Rpq}^{dB} , en utilisant la formule 6.12.

$$\text{SNR}_{qp} = e^{Rpq} - 1, \quad (6.13)$$

où R_{pq} est le taux de transmission entre les nœuds p et q , ce qui donne :

$$P_e(d) = C \left(\overline{\text{SNR}}_{qp}^{dB}, \sigma_q^2, \text{SNR}_{Rpq}^{dB} \right) \quad (6.14)$$

En effet, la formule 6.14, correspond à la zone D de la figure 6.6 et dépend de la variation de la distance d de la figure 6.7. Translatant horizontalement les plans à des fins de simplification, la probabilité d'erreur devient :

$$P_e^i(d) = C \left(0, \sigma_q^2, \overline{\text{SNR}}_{qp}^{dB} - \text{SNR}_{Rpq}^{dB} \right) \quad (6.15)$$

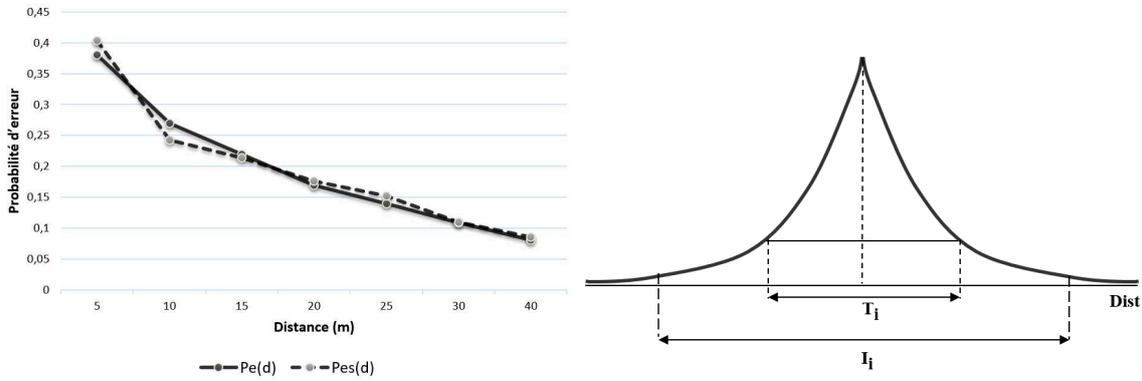
Dans ce contexte, la valeur moyenne du signal de bruit à chaque $i^{\text{ème}}$ nœud est obtenu à partir des formules (6.5-6.9) comme suit :

$$\overline{\text{SNR}}^{dB} - \text{SNR}_{qp}^{dB} = A - \gamma B_i(d) \quad (6.16)$$

où A est une constante de puissance P et $B_i(d)$ est une fonction de la distance d du nœud i .

Remplaçons la formule 6.16 dans la formule 6.15, nous obtenons

$$P_e(d) = C \left(0, \sigma_q^2, A - \gamma B(d) \right) \quad (6.17)$$



(a) Impact de la distance sur la probabilité d'erreur réelle (P_e) et simulée (P_{es})

(b) Distribution de l'interférence

FIGURE 6.8 – Coefficient de probabilité d'erreur γ sur la distribution d'interférence

Sur la base des résultats obtenus en variant la distance entre les deux flux et en utilisant le simplex comme méthode d'optimisation, la valeur de γ obtenu par simulation (figure 6.8 (a)) est de $2.97 \sim 3$. De ce fait, nous concluons que la portée d'interférence n'est pas égale à deux fois la portée de transmission ($I_i = 2T_i$) comme supposé dans la plupart des travaux dans ce domaine [5] [12] [6]. En revanche, c'est une fonction de distance qui suite la distribution illustrée dans la figure 6.8 (b) avec $\lim_{d \rightarrow \infty} f(d) = 0$.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle d'interférence dans les RCMSF pour une réception optimale et nous avons introduit un nouveau mécanisme nommé NMM (*Non-interfering Multipath Mechanism*) afin de limiter les interférences entre les chemins adjacents et améliorer le taux de réussite.

Par la suite, nous nous sommes intéressés aux transmissions multiples dans un environnement multi-paires (source, sink) où un modèle de perte de chemin a été défini et une nouvelle métrique relative aux interférences a été introduite dans la fonction objective afin de minimiser les collisions même en présence de chemins croisés. Enfin, le coefficient de probabilité d'erreur a été calculé sur la base des résultats de simulation pour valider l'approche de sélection adoptée.

Les chapitres de la partie suivante, seront consacrés aux tests de performances de notre protocole GNMFT par simulation et par implémentation matérielle.

Quatrième partie

Evaluation des performances

Chapitre 7

Evaluation des performances par simulation

Sommaire

7.1 Introduction	104
7.2 TinyOS	104
7.3 Implémentation de GNMFT sous TinyOS	106
7.4 TOSSIM	109
7.5 Scénario de simulation	110
7.6 Métriques mesurées	113
7.7 Résultats de simulation	114
7.7.1 Impact du nombre de chemins	114
7.7.2 Taux de Délivrance	115
7.7.3 Délai Moyen de Bout-en-bout	117
7.7.4 Energie Consommée	118
7.7.5 Débit de Réception	120
7.7.6 Facteur d'Equilibrage d'Energie	120
7.8 Conclusion	121

7.1 Introduction

Ce chapitre présente et discute les tests de performances de nos contributions relatives :

- Protocole de routage géographique multi-chemins;
- Modèle théorique du nombre de paquets perdus;
- Fonction objective multi-critères;
- Mécanisme de réparation des chemins défectueux;
- Mécanisme de prévention sur l'épuisement des batteries;
- Mécanisme des chemins non-interférents;
- Modèles d'interférence et de perte de chemins;

Afin de montrer la force et la fiabilité de nos solutions proposées, nous les avons d'abord implémentées sur la plateforme logicielle TinyOS [62] dédiée aux RCSE, avant de procéder à leur évaluation à grande échelle sur le simulateur TOSSIM [63] et à petite échelle sur un banc d'essai.

Nous nous sommes orientés vers ladite plateforme du fait qu'elle est ouverte, riche et modulaire [43]. En effet, elle intègre un simulateur puissant (TOSSIM) pour le test de performances à grande échelle et également en raison de sa compatibilité avec les capteurs réels de type Imote2, sujet de notre prochain chapitre relative à l'expérimentation matérielle à petite échelle.

7.2 TinyOS

TinyOS est un système d'exploitation embarqué avec une architecture basée sur l'association de composants, conçu pour les périphériques sans fil de faible puissance tel que les réseaux de capteurs. Il est principalement développé par *l'Université de Californie Berkeley* en collaboration avec *Intel Research* et la compagnie *Crossbow Technology*. Ses applications, tout comme le système lui-même, sont open-source et programmés en langage NesC (*Network Embedded Systems C*). Ce dernier, sera détaillé davantage dans la section suivante.

TinyOS opère sur une multitude de plateformes où sa conception diffère des autres OS qui présentent les caractéristiques suivantes :

- Architecture Multi-thread et par conséquent une mémoire importante;
- Modèle entrée/sortie avec une séparation entre espace noyau et utilisateur;
- Pas de contraintes d'énergie et ressources disponibles.

Par ailleurs, TinyOS répond aux contraintes des nœuds capteurs (mémoire et énergie limitée, CPU lente, bande passante faible et portée radio courte...etc) et offre trois caractéristiques

pour faciliter le développement des applications et des systèmes en se basant sur des opérations d'ultra faible consommation d'énergie [41] :

1. Un modèle de composants permettant d'écrire des petits morceaux de code réutilisables et indépendants de tout type de plateformes matérielles ;
2. Un modèle d'exécution concurrent qui permet de gérer l'accès simultané de plusieurs composants à la RAM, tout en respectant sa taille réduite ;
3. Un ensemble d'APIs (*Application Programming Interfaces*) pour l'usage fréquent tel que l'envoi et la réception des paquets, la réponse aux événements,...etc, ainsi que des services et des bibliothèques de composants très riches.

Nous avons opté pour la version TinyOS 2, en raison des nouvelles fonctionnalités apportées par rapport à l'ancienne version telles que l'amélioration des interfaces de gestion de l'alimentation et l'introduction du mode *Split-Phase* dans la gestion des commandes et des événements [62]. De plus, TinyOS 1 reposait essentiellement sur l'application elle-même pour gérer les états de mise sous/hors tension de tous les périphériques grâce à l'interface *StdControl*. Tandis que TinyOS 2 fonctionne différemment en divisant les périphériques en deux classes :

- Le micro-contrôleur, qui dispose fondamentalement de suffisamment d'informations pour calculer indépendamment l'état d'alimentation à utiliser ;
- Les périphériques, qui ont une sémantique plus simple et deux états de base, *On* et *Off*.

Le fonctionnement de TinyOS s'appuie sur la gestion des événements (activation de tâches, interruptions,...etc). Ce fonctionnement événementiel (*event-driven*) s'oppose au fonctionnement temporel (*time-driven*) où les actions du système sont gérées par une horloge donnée.

La structure orientée composants de TinyOS est basée sur le modèle Utilisateur-Fournisseur (*User-Provider*) d'interfaces bidirectionnelles tel décrit sur la figure 7.1. Cette dernière, présente le modèle de communication commandes/événements entre les deux composants User et Provider. Ainsi, l'utilisateur appelle une commande (des composants applicatifs vers les composants les plus proches du matériel) pour solliciter un service auprès du fournisseur, et ce dernier lui remonte les signaux d'événements du bas vers le haut une fois que la requête est traitée.

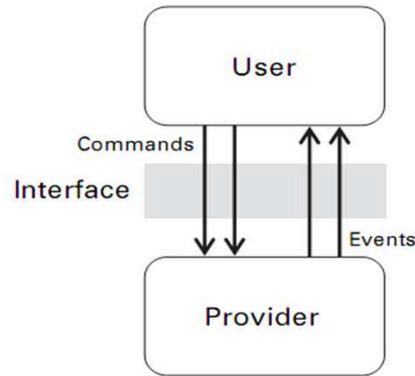


FIGURE 7.1 – Modèle de composants de TinyOS [62]

Network Embeded Systems C (NesC)

NesC est un langage de programmation conçu pour incarner les concepts structurant et le modèle d'exécution de TinyOS. C'est une extension du langage C orientée composant, qui minimise l'utilisation de la mémoire et de la puissance de calcul des capteurs souvent avec des ressources limitées (batterie de faible puissance et non changeable, mémoire réduite...etc).

L'unité de code de base de NesC est le composant qui exécute des commandes, lance des évènements et implémente des interfaces. Le composant dans NesC dispose d'une frame pour stocker l'état local et utilise la notion de pile pour gérer la concurrence. Il existe deux types de composants : module et configuration. Le composant module implémente une ou plusieurs interfaces qui définissent d'une manière abstraite les interactions entre deux composants. Le composant de configuration relie d'autres composant ensemble pour former un nouveau composant.

7.3 Implémentation de GNMFT sous TinyOS

Notre protocole de routage GNMFT opère sur la couche réseau pour le routage des paquets et sur la couche transport pour leur réorganisation en raison de la transmission multi-chemins. La figure 7.2 présente un schéma complet et simplifié de l'implémentation qui satisfait à la fois la pile protocolaire des RCSF et l'interaction avec les différents composants systèmes de TinyOS.

Afin de gérer les communications, notre protocole interagît avec le composant *ActiveMessage* pour la partie logicielle (*software*) et l'horloge pour la partie matérielle (*hardware*). Notre solution offre également des interfaces à l'utilisateur pour la formulation des différentes requêtes et l'introduction des paramètres d'initialisation selon le type d'application.

La figure 7.3, montre une vue détaillée de l'architecture proposée de notre protocole sous

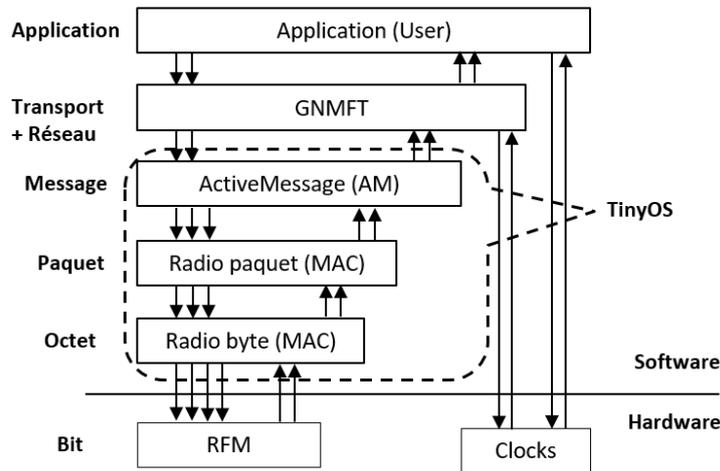


FIGURE 7.2 – Couche de composants simplifiée pour l'implémentation de GNMFT

TinyOS, ainsi que l'interaction entre les trois principaux modules : l'utilisateur final, le module principal de notre protocole et le module système offert par TinyOS.

En effet, GNMFT fournit à l'utilisateur les trois principales interfaces suivantes :

1. *AMSend* : pour l'appel de commandes de début d'envoi des données multimédia à partir de la source vers le sink.
2. *Receive* : pour signaler à l'utilisateur les événements de réception des paquets multimédia au niveau du sink.
3. *Init* : pour l'introduction des paramètres d'initialisation de la couche applicative, tels que : la spécification des nœuds sources et sinks, le débit, la durée de transmission et le nombre de chemins à utiliser.

Par ailleurs, notre protocole fait appel aux interfaces fournies par les composants systèmes :

- *ActiveMessageC* : composant primordial pour la communication sans fil à un saut où nous avons utilisé quelques interfaces fournies, à savoir :
 - *AMPacket* : permet l'accès aux champs des adresses sources/sinks des messages ;
 - *Packet* : donne l'accès à quelques champs spécifiques du message, telles la taille maximale et la charge utile (*PayLoad*) ;
 - *PacketAcknowledgements* : permet au composant d'activer/désactiver l'acquittement des paquets au niveau MAC.
- *AMSenderC* et *AMReceiverC* : composants génériques, qui représentent respectivement l'abstraction de l'envoi/la réception du composant *ActiveMessageC*. Ils permettent l'envoi/la réception des messages de données et le contrôle via les instanciations multiples ;

- *AMSnooperC* : composant générique représentant l'abstraction de la fonctionnalité de sur-écoute (*OverHearing*) du composant *ActiveMessageC*. Il permet de sniffer les paquets non destinataires au nœud courant ;
- *BigQueueC* : ce composant permet de créer une file d'attente de type *FIFO* au niveau de chaque capteur, servant comme cache d'envoi et de réception des messages de données ;
- *TimerMilliC* : composant générique pour l'instanciation des minuteurs (*Timers*) avec une précision de milli-seconde. Ces *Timers* servent dans notre implémentation à définir le débit du flux multimédia, les cycles des messages de signalisation (*Beacons*) ainsi que la durée totale d'envoi des données.

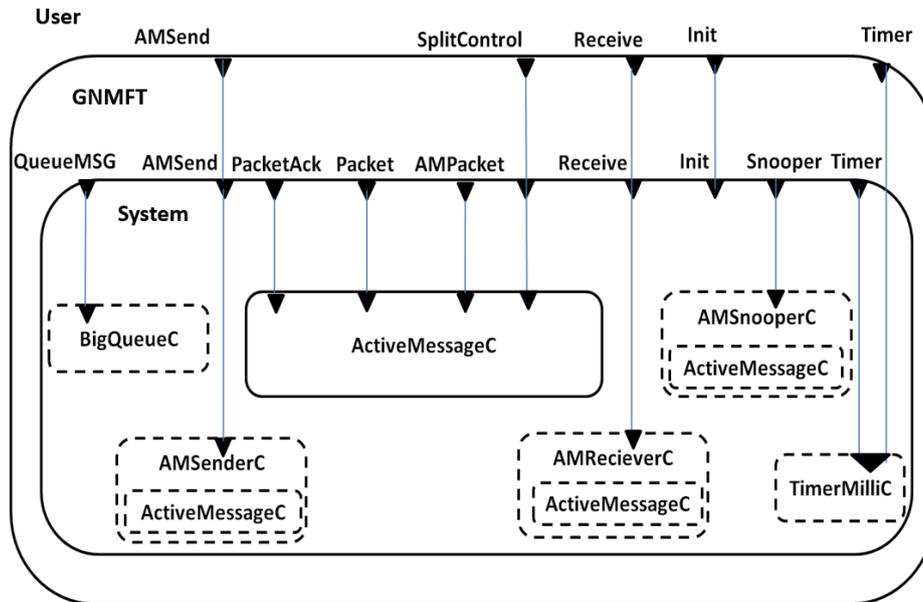


FIGURE 7.3 – Architecture détaillée du protocole proposé sous TinyOS

Cette manière de modélisation qui profite de la modularité offerte par TinyOS, rend le programme souple et facile à manipuler. En effet, le fait de séparer le cœur de fonctionnement de notre protocole du programme utilisateur, allège et simplifie la tâche à ce dernier. Cependant, l'utilisateur final formule sa requête de routage, en précisant les paramètres d'initialisation appropriés au type d'application envisagée, sans se préoccuper du fonctionnement interne. A la fin de la simulation, un état global récapitulant l'activité de tous les nœuds capteurs (paquets envoyés et reçus, énergie résiduelle, longueur moyenne des chemins utilisés,..etc.) sera généré automatiquement.

7.4 TOSSIM

TinyOS SIMulator (TOSSIM) est un simulateur à événements discrets dédié aux réseaux de capteurs sans fil, employant la plateforme TinyOS. Il permet aux utilisateurs d'exécuter, tester et analyser leurs protocoles dans un environnement répétitif et contrôlé, avant de procéder au déploiement sur des capteurs réels [63].

Chaque bibliothèque de composants dans TinyOS a son module correspondant dans TOSSIM. Ce dernier supporte deux interfaces de programmation : *Python* et *C++*. Nous avons choisi *Python* parce qu'il offre une interaction dynamique avec le programme en cours d'exécution et permet également d'injecter des codes scripts afin de charger la topologie du réseau et préciser les débuts et fins des simulations.

Néanmoins, l'absence d'un modèle interactif d'estimation d'énergie où les transitions d'un événement à un autre se produisent instantanément sans suivi du temps d'exécution demeure le défi à relever de ce simulateur. En revanche, TOSSIM dispose d'un plugin appelé *PowerTOSSIMz*, pour la modélisation de la consommation d'énergie des nœuds capteurs dans l'environnement de simulation. Sa conception se base sur les caractéristiques du modèle d'énergie utilisé par les capteurs de type *MICAz*, notamment l'effet non linéaire des charges des batteries [64].

Par ailleurs, *PowerTOSSIMz* permet de tracer tous les événements des composants qui ont un rapport avec l'énergie et passer par la suite, le fichier résultant à un calcul post-processeur qui implémente son modèle d'énergie. A la fin, un bilan détaillé de la consommation d'énergie de tous les nœuds capteurs est généré.

Nous avons constaté que le fonctionnement de *PowerTOSSIMz*, ne nous permet pas de gérer directement l'état d'énergie des nœuds capteurs au moment de l'exécution du programme. En effet, il n'est pas possible de router un paquet de données vers le voisin ayant la plus grande énergie résiduelle, en raison de l'impossibilité de lecture de cette valeur à partir du code TinyOS en utilisant *PowerTOSSIMz*.

De ce fait, nous nous sommes orientés vers l'implémentation de notre modèle de consommation d'énergie décrit précédemment dans la section 5.2, qui reproduit le modèle d'énergie de communication de *PowerTOSSIMz* et ce essentiellement dans le volet de communication radio (émission et réception). Cette solution nous offre une flexibilité dans la gestion de l'état énergétique des nœuds capteurs.

Afin de valider cette approche, nous avons procédé à des tests de comparaison entre notre modèle d'énergie et le modèle d'énergie de *PowerTOSSIMz*. Les résultats de la figure 7.4 obtenus, montrent une concordance entre les deux modèles à l'exception d'une légère différence

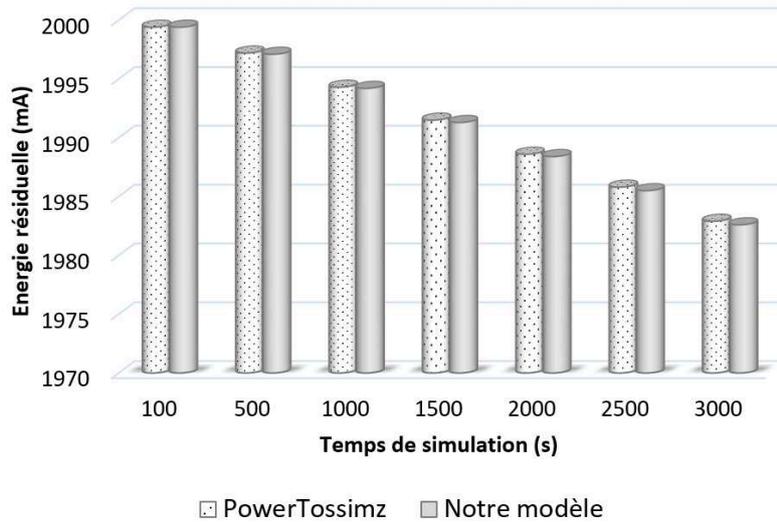


FIGURE 7.4 – Résultat de l’implémentation du modèle d’énergie

qui est due au modèle de recouvrement des batteries employé par *PowerTOSSIMz*, et qui n’est pas pris en compte dans notre modèle.

Par ailleurs, TOSSIM est basé sur le modèle de communication de la plateforme matérielle *MICAz* de la société *Crossbow Technology*. Ce modèle intègre une radio (émetteur/récepteur radio-fréquence) de type *ChipCon CC2420*, ayant une fréquence de 2,4 GHz et un débit maximum de 250 Kbps, avec compatibilité Zigbee (dédiée aux applications à basse consommation d’énergie et à faible voltage). Dans la couche MAC, TOSSIM utilise le protocole *CSMA-TinyOS* [63]. Ce dernier gère un accès multiple aléatoire basique au canal, de façon à ce que la probabilité des collisions soit minimale.

7.5 Scénario de simulation

Nous avons opté pour un scénario événementiel, dans lequel dès qu’un nœud capteur détecte un événement, il actionne sa caméra embarquée pour débiter soit l’enregistrement ou la capture d’images selon la nature de l’application envisagée. A cet effet, le capteur concerné qui sera la source de l’évènement, déclenche l’exécution du protocole pour transférer la donnée multimédia collectée (vidéo ou image) en temps réel (streaming dans le cas de vidéo) à un sink du réseau définie selon la zone d’intérêt. Ce dernier est relié à une station de base ou à via une connexions internet, afin d’alerter l’utilisateur final et activer la procédure adaptée.

Dans ce contexte, nous avons implémenté à la fois AGEM et EA-TPGF qui représentent deux protocoles de routage géographique robustes. Ils adoptent la transmission sur multi-chemins et contournent les trous statiques pendant la construction des chemins. AGEM, est un protocole de routage réactif qui utilise un processus intelligent basé sur l’angle de vue adaptatif

lors du transfert glouton, tandis que EA-TPGF qui est une extension de TPGE, prend en charge l'énergie résiduelle des nœuds durant le processus d'identification des chemins d'une manière proactive.

TABLEAU 7.1 – Paramètres de simulation utilisés

Topologie	480 m × 240 m
Nombre de capteur	253
Couche MAC	CSMA-TinyOS
Couche radio	CC2420
Canal de transmission	Canal sans fil
Bande passante	250 Kbits/s
Portée de transmission	25 mètres
Taille des données transmises	5.84 Mo
Taille d'un paquet de données	128 octets
Taille de la file d'attente	30 paquets
Durée de simulation	300 secondes
Nombre de chemin	5

Cependant, nous avons effectué plusieurs simulations, en variant le débit de transmission, le nombre de chemins opérationnels ainsi que le niveau de charge des batteries, afin de mesurer les performances de notre protocole de routage et l'ensemble de ses mécanismes intégrés de tolérance aux pannes et de gestion d'interférence. Pour ce faire, plusieurs métriques d'évaluation ont été mesurées et qui seront détaillées dans la section suivante. Le tableau 7.1 résume l'ensemble des paramètres de simulation utilisés et l'annexe B, explique notre choix de la taille du paquet multimédia utilisé dans la transmission de données.

Dans ce contexte, les simulations ont été réalisées sur la topologie de la figure 7.5 où 5 chemins de routages ont été établies entre la source et le sink et 49906 paquets données ont été envoyés, soit 5.84 Mo. La portée de transmission étant fixée à 25 mètres, chaque nœud a un maximum de 6 voisins à un saut comme l'indique la figure 7.6 (a) où l'ensemble de ses voisins dans son *NeighborSet* sont éloignés de : $d(20m)$ et $d_1(22,36m)$.

Afin de mieux présenter notre approche relative à la gestion des interférences décrite dans le 6^{ème} chapitre, nous avons augmenté la densité du réseau vue que la portée de transmission des nœuds dans le cas réel reste inchangée (25 mètres). A cet effet, nous avons préféré la configuration en grille, illustrée dans la figure 7.6 (b) où chaque nœud a 24 voisins dans son *NeighborSet*, dont 8 voisins à 1 saut (les nœuds vides) et 16 voisins à 2 sauts (les nœuds pleins).

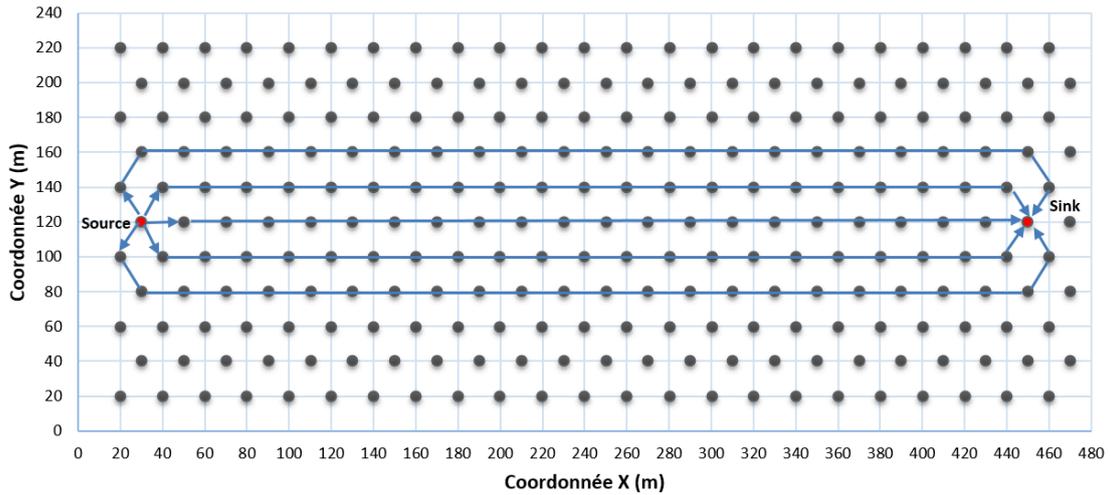


FIGURE 7.5 – Topologie de simulation utilisée

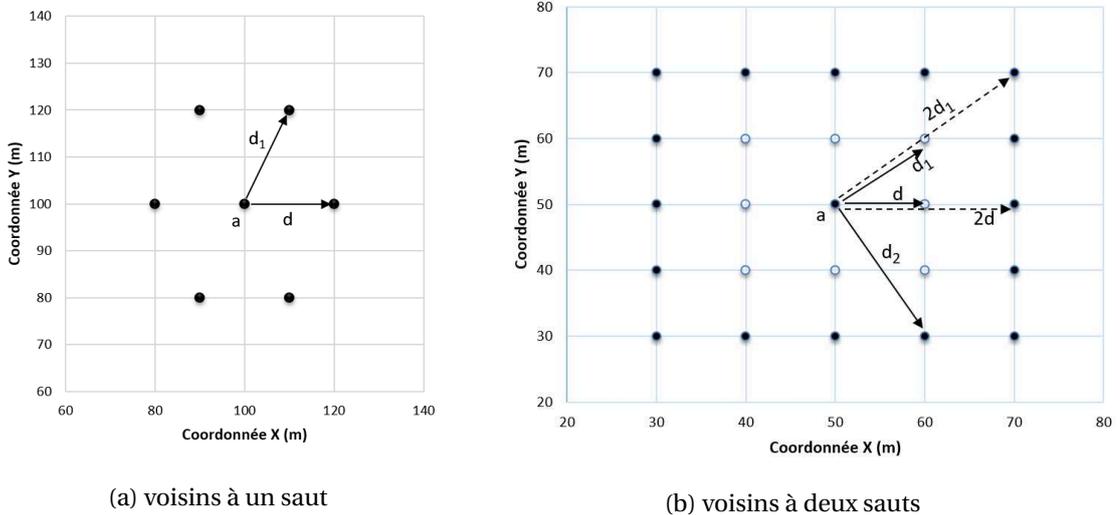


FIGURE 7.6 – ForwardingSet du nœud courant

Les 24 voisins sont écartés par rapport au nœud courant par les distances suivantes : $d, 2d, d_1, 2d_1$ et d_2 .

En ce qui concerne les pannes soudaines, nous les avons occasionnées de façon intentionnelle à différents temps de la simulation, par extinction des nœuds ciblés. Nous avons également choisi d'affecter de 40% à 60% des chemins opérationnels pour chaque scénario de simulation réalisé.

Par ailleurs et afin de mieux comparer les différents protocoles implémentés en fonction du paramètre énergie notamment notre mécanisme de prévention, nous avons lancé 100 événements où à chaque occurrence, la réception et la transmission ont été amplifiées par 1000 afin d'épuiser les batteries assez rapidement que possible pour avoir un écart considérable.

7.6 Métriques mesurées

Afin de comparer au mieux les différents protocoles implémentés, nous avons choisi des métriques d'évaluations adéquates avec la nature des données multimédia, à savoir : le taux de délivrance, l'énergie consommée, le délai moyen des paquets de bout-en-bout, le débit de réception et le facteur d'équilibrage d'énergie. De plus, l'intervalle de confiance (I_c) employé est de 90% et le $z^* = 1.645$, en utilisant la formule 7.1, avec $z^* = \Phi^{-1} \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) = -\Phi^{-1} \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ où Φ désigne la fonction de distribution cumulative de la distribution gaussienne.

$$I_c = \left(\bar{x} - z^* \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n}}, \bar{x} + z^* \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n}} \right) \quad (7.1)$$

- Taux de Délivrance (TD) : c'est le rapport entre le nombre de paquets reçus (N_{PR}) et le nombre total de paquets envoyés (N_{PE}) durant toute la simulation. Cette métrique reflète la fiabilité du protocole dans l'acheminement des paquets de la source vers le sink. En effet, un taux de délivrance élevé donne une meilleure qualité du flux reçu. Nous définissons le taux de délivrance comme suit :

$$TD = \frac{N_{PR}}{N_{PE}} \quad (7.2)$$

- Energie Consommée (EC) : c'est l'énergie que dépense chaque nœud pour transférer les paquets de données après chaque évènement. Elle est calculée par la formule 7.3, où E_{I_k} et E_{R_k} représentent respectivement l'énergie initiale et l'énergie résiduelle du nœud k .

$$EC_k = E_{I_k} - E_{R_k} \quad (7.3)$$

Par conséquent, l'énergie nécessaire au protocole de routage pour acheminer le flux de bout-en-bout, se résulte par la somme des énergies consommées par tous les nœuds du réseau comme indiquer dans la formule 7.4.

$$EC_{réseau} = \sum_{i=1}^N E_{I_i} - E_{R_i} \quad (7.4)$$

- Délai Moyen de Bout-en-bout (DMB) : c'est le temps de séjour moyen des paquets dans le réseau depuis leur émission de la source jusqu'à leur arrivé au sink. Ce délai inclut le temps de traitement et le temps de séjours dans les files d'attente, tandis que le temps de transmission étant négligé. Formellement, si un paquet p passe par un chemin contenant n nœuds intermédiaires, son délai moyen de bout-en-bout (DMB_p) est obtenu par la formule 7.5, où T_{in_k} représente le temps d'arrivé du paquet au nœud k et T_{out_k} est le temps de sortie du paquet de la file d'attente, de ce nœud.

$$DMB_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k (T_{out_k} - T_{in_k}) \quad (7.5)$$

Ainsi, le délai moyen de bout-en-bout de tous les paquets est calculé par la formule 7.6.

$$DMB_{réseau} = \frac{1}{N_{PR}} \sum_{i=p}^{N_{PR}} DMB_p \quad (7.6)$$

- Débit de Réception (DR) : Cette métrique nous permet de mesurer la continuité de réception du flux au niveau du sink (un débit de réception élevé nous donne une bonne qualité du flux multimédia). Le DR donné par la formule 7.7 indique le taux moyen des paquets reçus par unité de temps, où $T_{N_{PR}}$ est le temps de réception du dernier paquet et T_{p_1} est le temps de réception du premier paquet.

$$DR = \frac{N_{pr}}{T_{N_{PR}} - T_{p_1}} \quad (7.7)$$

- Facteur d'Equilibrage d'Energie (FEE) : cette métrique permet de mesurer la répartition d'énergie dans le réseau où une bonne distribution de charge prolonge la durée de vie du réseau en évitant la création des vides. A cet effet, le meilleur protocole de routage est celui qui minimise les écarts entre les énergies résiduelles des nœuds. FEE représente l'écart-type où E_{moy} désigne la moyenne des énergies résiduelles de tous les nœuds.

$$FEE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_{R_i} - E_{moy})^2} \quad (7.8)$$

7.7 Résultats de simulation

Avant de procéder à la comparaison des protocoles proposés selon les métriques choisies, nous avons analysé en premier lieu l'impact du nombre de chemins sur la qualité de transmission des flux multimédia.

7.7.1 Impact du nombre de chemins

Dans cette partie, nous avons mesuré le taux de délivrance pour les trois protocoles GNMFT, ET-TPGF et AGEM, en fixant le débit d'envoi à 120 paquets/seconde et en variant le nombre de chemins de 3 à 10. La figure 7.7 présente les résultats obtenus.

Nous remarquons que le taux de délivrance est proportionnel au nombre de chemins utilisés pour les trois protocoles. En effet, quand le nombre de chemins est réduit, les nœuds capteurs sont plus chargés et les files d'attente débordent rapidement, ce qui à pour conséquence,

une perte importante de paquets de données. A cet effet, nous déduisons que pour le haut débit et les flux multimédia volumineux, la transmission sur plusieurs chemins est nécessaire afin d’avoir un taux de délivrance satisfaisant.

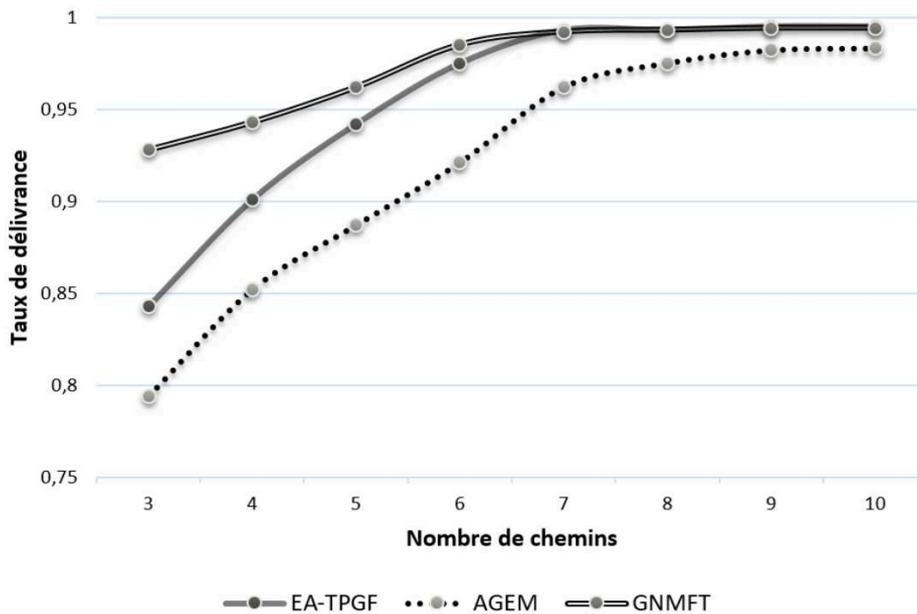


FIGURE 7.7 – Impact du nombre de chemins sur le taux de délivrance

Dans ce qui suit, nous analysons l’impact du débit d’envoi sur la qualité de transmission des données multimédia en le variant de 70 à 130p/s avec une transmission sur 5 chemins.

7.7.2 Taux de Délivrance

Les figures 7.8 et 7.9 indiquent que GNMFT enregistre un écart significatif de fiabilité par rapport à EA-TPGF et AGEM. En effet, d’après l’histogramme de la figure 7.8, les taux de réussite de EA-TPGF et AGEM affichent une nette détérioration en approvisionnant respectivement les 47% et 61%, lorsque 5 nœuds appartenant aux différents chemins tombent en pannes (un nœud en panne par chemin).

Cela est dû principalement à l’absence de politique de maintenance des chemins face aux trous dynamiques (défaillance des capteurs pendant la transmissions des données en temps réel) dans le cas de EA-TPGF et le manque de stratégie de gestion des chemins interférents dans AGEM. Ce dernier, qui utilise le routage glouton intelligent en mode réactif, enregistre au début (de 1 à 3 nœuds en panne) un taux satisfaisant supérieur à 80% avec un sur-coût énergétique, mais qui se dégrade rapidement après 4 et 5 nœuds en pannes. Cependant, nous confirmons la formule 5.9 relative à la modélisation du nombre de paquets perdus (NPP) et nous constatons que plus grand est le trou dynamique, plus petit est le taux de fiabilité.

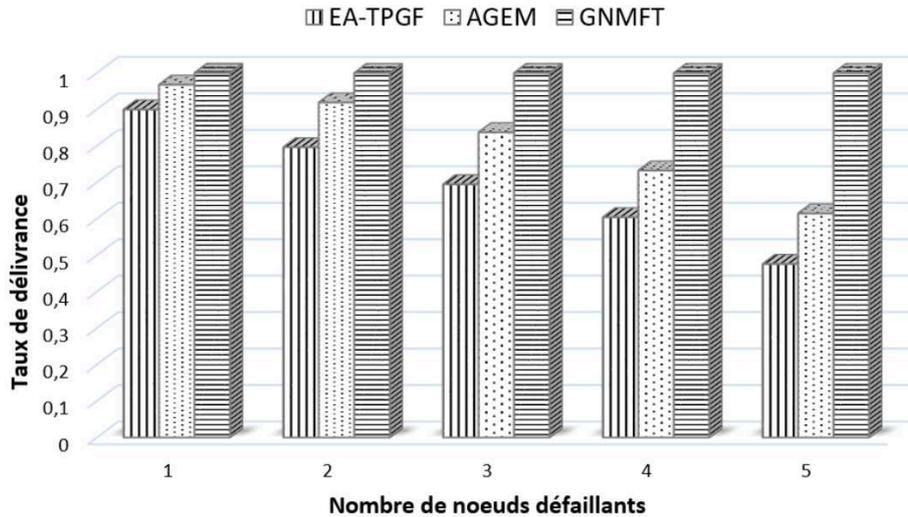


FIGURE 7.8 – Impact du nombre de nœuds défectueux sur le taux de délivrance

Nous remarquons également, qu’au-delà de 100p/s comme présenté dans la figure 7.9, les courbes des taux de succès des trois protocoles diminuent mais celles de EA-TPGF et AGEM baissent d’une manière importante en raison du grand nombre de collisions, dues à la concurrence d’accès au canal pour les nœuds adjacents. De plus, le débordement des files d’attentes cause l’effet de congestion lors des transmissions dans AGEM et impacte considérablement sur son taux de réussite, où ce protocole utilise uniquement le mode marche arrière face aux vides/obstacles. Tandis que, la réduction des chemins opérationnels dans EA-TPGF en plus du débit élevé provoquent d’énorme perte où tous les paquets de données qui ont emprunté les chemins défectueux sont à priori perdus.

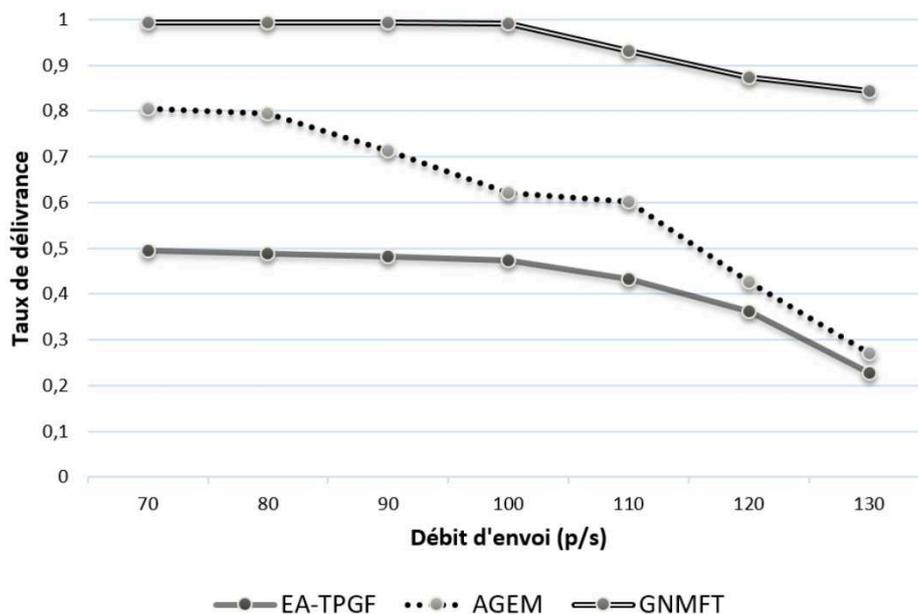


FIGURE 7.9 – Impact du débit d’envoi sur le taux de délivrance

Par ailleurs, l’histogramme de la figure 7.10 illustre le nombre de paquets perdus sur un envoi de 49906 paquets de données (5,84 Mo) où nous voyons clairement l’écart important entre les différentes stratégies employées, à savoir : proactive(EA-TPGF), réactive (AGEM) et hybride (GNMFT).

Notre stratégie de fonctionnement hybride relative à la conception de GNMFT décrite précédemment dans la section 3.2, combinée avec le mécanisme curatif de tolérance aux pannes et le mécanisme de chemins non-interférents, assurent une meilleure fiabilité des données transmises. En effet, le FCM répare localement les ruptures des liens de communication au moment de la transmission tout en minimisant le NPP et le NMM diminue considérablement les interférences entre les chemins adjacents, ce qui augmente le taux de réussite des paquets acheminés.

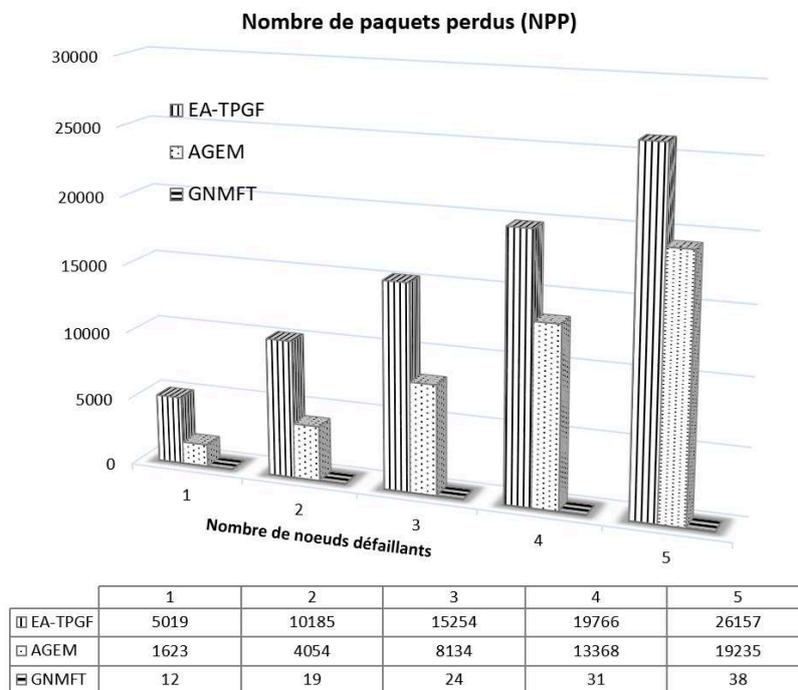


FIGURE 7.10 – Impact du nombre de nœuds défaillants sur le nombre de paquets perdus

7.7.3 Délai Moyen de Bout-en-bout

La figure 7.11 montre que le délai moyen de bout-en-bout est proportionnel au débit d’envoi dans AGEM et EA-TPGF. Lorsque le débit augmente, les paquets prennent plus de temps dans les files d’attente avant leurs envois.

En effet, AGEM enregistre les délais les plus élevés. Son mode de marche arrière pour reconstruire le chemin défaillant en cas de panne ou de mobilité, ralentit l’envoi des paquets de données. Même constat au niveau de EA-TPGF où sa courbe est plus proportionnelle en raison

de la longueur des routes empruntés surtout en cas de changement de topologie. De plus, l'absence de stratégie de maintenance réduit le nombre de chemins opérationnels, ce qui prolonge la durée de séjour des paquets de données dans les files d'attente.

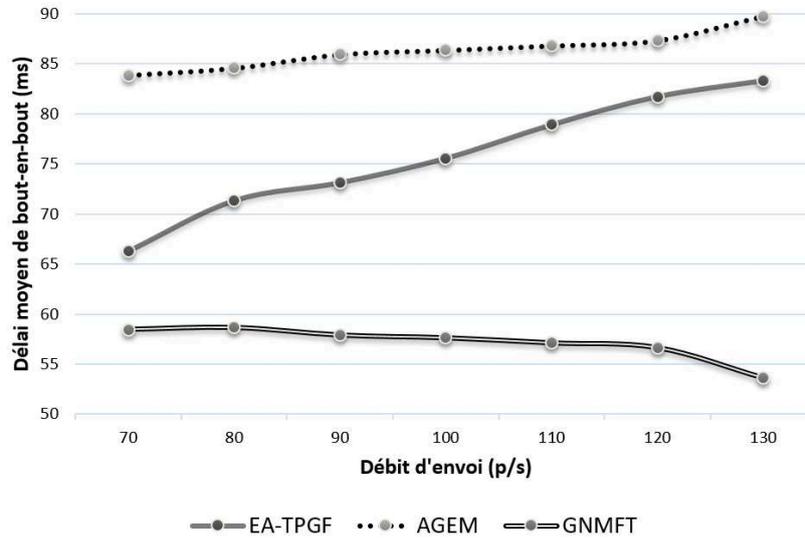


FIGURE 7.11 – Impact du débit d'envoi sur le délai moyen de bout-en-bout

Par ailleurs, les liens maintenus par notre mécanisme de réparation sont plus courts en termes de nombre de sauts, par rapport aux chemins empruntés par AGEM et EA-TPGT, ce qui réduit positivement le délai moyen de tous les paquets. D'un autre coté, la technique curative utilisée permet d'employer plus de chemins et d'alléger les files d'attente. De plus, l'accès au canal de transmission est plus rapide dans GNMFT par rapport aux autres protocoles, en raison des faibles interférences ou chevauchements des canaux radio pour les nœuds opérationnels appartenant aux chemins de routage parallèles. A cet effet, les collisions de paquets sont réduites et la circulation du flux multimédia est plus fluide.

7.7.4 Energie Consommée

Les différents scénarios de la figure 7.12 où nous avons généré 20, 60 et 100 évènements, illustrent clairement que l'énergie consommée par GNMFT est la mieux équilibrée avec un léger surcote par rapport aux autres protocoles pour GNMFT + MI (métrique d'interférence).

En effet, notre fonction objective du choix de prochain saut décrite dans la section 5.3 assure un équilibrage de charge dans le réseau. Elle évite la sur-exploitation des nœuds appartenant aux chemins optimaux où les nœuds vulnérables avec une faible énergie résiduelle sont filtrés dès la construction de chemins. Cette propriété est également présente dans EA-TPGF, qui part sa fonction objective répartie la charge dans le réseau. Néanmoins, ce dernier enregistre un écart important lorsque certains nœuds tombent en panne, et par conséquent les

nœuds se trouvant après les nœuds défaillants gardent leurs réserves énergiques depuis la rupture jusqu'à la fin de simulation.

L'énergie consommée est également équilibré dans AGEM du fait qu'il se base primo sur le routage intelligent lors de la sélection du nœud de prochain saut et secundo sur son mode réactif. En revanche, face aux trous dynamiques qui peuvent surgir dans le réseau, la consommation augmente chez les nœuds qui entourent les trous. En effet, ces derniers essayent de router les paquets de données au fur et à mesure via d'autres chemins en inondant le réseau par les messages de mis à jour.

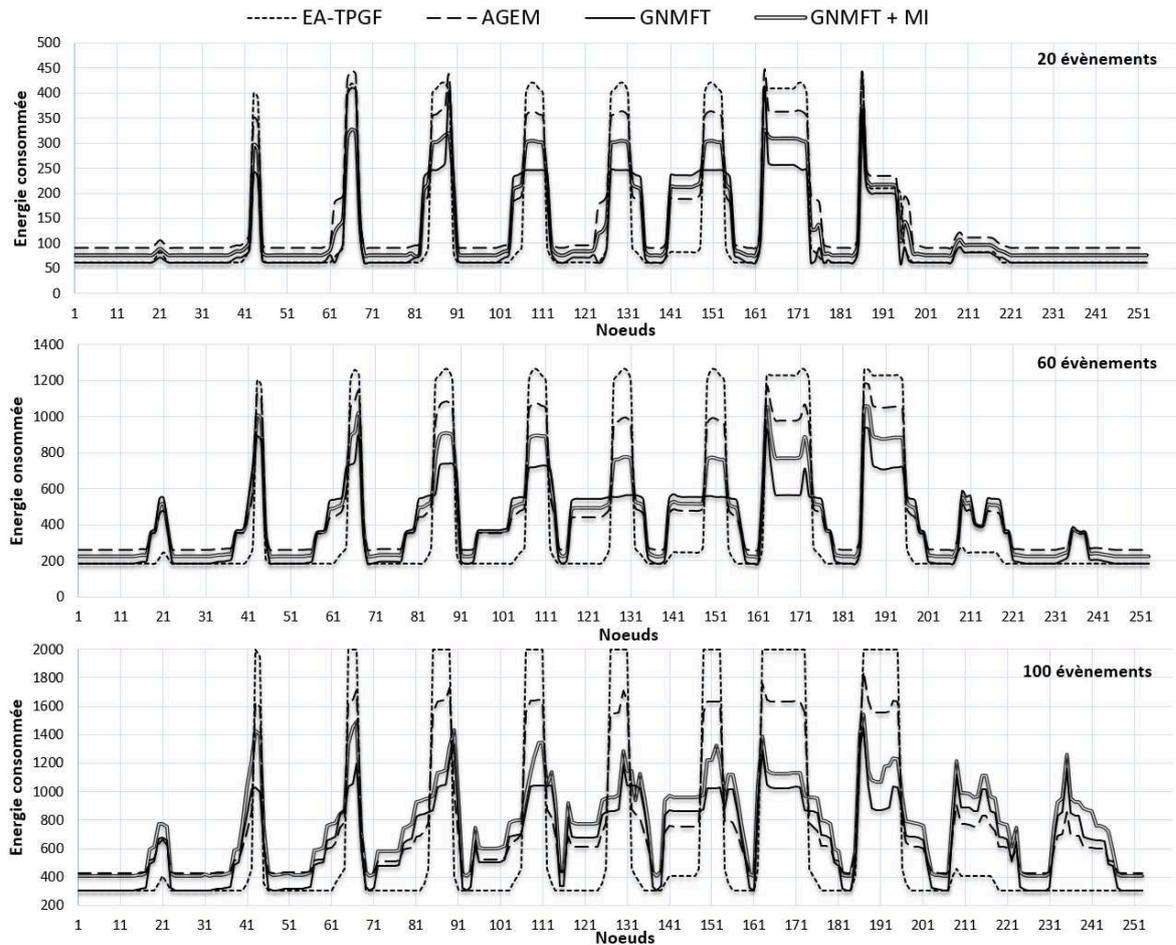


FIGURE 7.12 – Energie consommée après 20, 60 et 100 évènements

Après 100 évènements, un grand nombre de nœuds s'éteint dans EA-TPGF en raison de l'épuisement de leurs batteries, et un écart significatif est également constaté dans AGEM suite aux messages de contrôles. Tandis que GNMFT à une énergie répartie d'une façon équitable grâce à sa fonction objective du choix de prochain saut et son mécanisme préventif de tolérance aux pannes. Ce dernier garantit que l'énergie résiduelle restante de tous les capteurs soit supérieure au seuil critique défini et empêche toutes pannes liées à l'épuisement totale des

batteries. Néanmoins, GNMFT présente un léger sur-coût énergétique en raison des messages de contrôle utilisés pour la construction des chemins non interférents.

7.7.5 Débit de Réception

Le graphe de la figure 7.13, nous indique que, jusqu'au débit d'envoi 110p/s, les débits de réception de AGEM et GNMFT ont presque la même évolution, tandis que le débit de réception de EA-TPGF est beaucoup plus faible en raison du taux de perte élevé des paquets de données suite à la réduction du nombre de chemins.

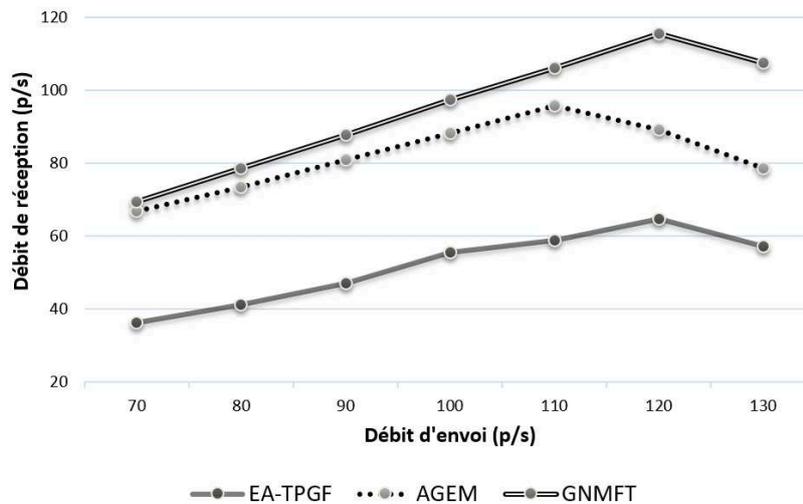


FIGURE 7.13 – Impact du débit d'envoi sur le débit de réception

Au delà de 110p/s, nous remarquons une régression importante du débit de réception du protocole AGEM, par rapport à GNMFT. En effet, lorsque les trous sont détectés, AGEM essaye de les contourner d'une manière réactive en temps réel, ce qui surcharge davantage les nœuds à proximité de ces trous et provoque des interactions entre les chemins de routage proches. Par conséquent, les routes utilisées ne supportent plus le grand flux d'émission au delà d'un certain seuil et les files d'attente débordent rapidement. En revanche, notre mécanisme de gestion d'interférences qui permet de construire des chemins non interférents, combiné avec le mécanisme curatif, qui bloque l'itinéraire défectueux au moment de la construction du trajet alternatif en temps réel et qui distribue en parallèle le flux d'une manière dynamique, fournissent un débit de réception élevé du fait qu'ils assurent la livraison de l'ensemble des paquets au niveau du sink.

7.7.6 Facteur d'Equilibrage d'Energie

La figure 7.14 indique qu'après 50 événements, le FEE de EA-TPGF enregistre une évaluation importante et donc le moins équilibré. En effet, tout le trafic multimédia est acheminé via

un nombre réduit de chemins et comme conséquence à cela, les nœuds capteurs constituant ces routes épuisent leurs réserves énergétiques assez rapidement et l'écart d'énergie, vis-à-vis des autres nœuds du réseau augmente, ce qui aggrave considérablement le facteur d'équilibrage d'énergie.

L'écart d'énergie est moins important dans AGEM, qui utilise le routage réactif prenant en considération l'énergie résiduelle du voisin pendant la construction des chemins. Néanmoins, nous constatons la progression du FEE durant ces 100 évènements, ce qui montre que l'approche en ligne utilisée n'est pas efficace face aux pannes.

Par ailleurs, le FEE de GNMFT est largement au dessous, ce qui indique qu'il est le plus équilibré. Nous justifions cela, par le fait que GNMFT répartie le flux de données sur un nombre élevé de chemins opérationnels. De plus, la fonction objective relative au choix de prochain saut adoptée renforcée par le mécanisme de prévention et gestion d'interférence, permettent de distribuer la charge sur l'ensemble des nœuds du réseau d'une manière éloignée et uniforme.

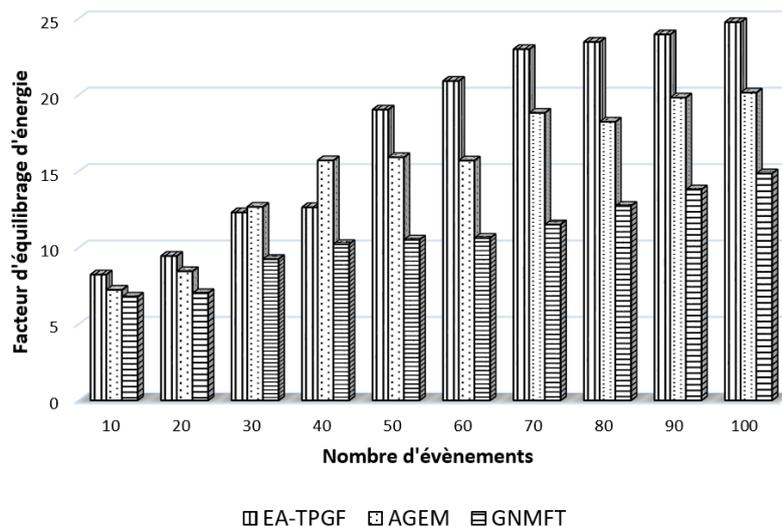


FIGURE 7.14 – Facteur d'équilibrage d'énergie

7.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur le système d'exploitation TinyOS dédié aux RCSF et le simulateur TOSSIM. A cet effet, nous avons présenté notre conception proposée sur cette plateforme, l'architecture détaillée et l'interaction avec les composants systèmes offerts par TinyOS. Par la suite, nous avons défini le scénario de simulation et les métriques utilisées dans les tests des performances des différents protocoles.

Enfin, les résultats obtenus par simulation ont montré clairement que notre protocole en-

registre de meilleures performances dans la transmission des flux multimédia en temps réel et même en cas de pannes, notamment en termes de taux de délivrance où le nombre de paquets perdus présente un écart significatif comparant aux autres protocoles étudiés. Les performances en termes de délai de transmission des données de bout-en-bout et de débit de réception ont été très satisfaisant.

Néanmoins, l'utilisation des requêtes de bruits (*Noisy*) dans la fonction objective lors de la phase de construction de chemins et les messages de contrôles pour GNMFT+MI, ont entraîné une sur-consommation énergétique dans le réseau. De plus, ces opérations requièrent un nombre élevé de nœuds capteurs permettant de trouver des trajets alternatifs et disjoints en même temps. Par conséquent, l'apport de la nouvelle métrique relative aux interférences est fortement influencée par la densité du réseau.

Chapitre 8

Evaluation des performances par expérimentation matérielle

Sommaire

8.1 Introduction	124
8.2 Plateforme Imote2 (Intel Mote 2)	124
8.3 Architecture réseau	126
8.4 Résultats expérimentaux	127
8.4.1 Taux de Délivrance	128
8.4.2 Energie Consommée	129
8.4.3 Délai Moyen de Bout-en-bout	129
8.4.4 Facteur d'Equilibrage d'Energie	130
8.4.5 Débit de réception	131
8.5 Conclusion	132

8.1 Introduction

Après avoir observé le comportement du protocole de routage GNMFT (*Geographic Non-interfering Multipath Fault Tolerant*) et ses mécanismes associés : FCM (*Faulty-paths Curative Mechanism*), EPM (*Energy-efficient Preventive Mechanism*) et NMM (*Non-interfering Multipath Mechanism*), à grande échelle via le simulateur TOSSIM, nous procédons dans cette 2^{ème} étape d'évaluation, à un déploiement réel à petite échelle. L'objectif étant de confirmer les performances par implémentation matérielle, sur la plateforme Imote2.

8.2 Plateforme Imote2 (Intel Mote 2)

Imote2 est une plateforme de capteur sans fil conçu par la société américaine *Crossbow* pour les applications exigeantes en calcul (CPU) et en liaison sans fil avec une fiabilité de transmission. Elle est basée sur :

- Le processeur XScale d'Intel (PXA271), qui peut fonctionner dans un mode basse tension (0,85 V) et basse fréquence (13 MHz), permettant ainsi un fonctionnement à faible puissance;
- Un émetteur-récepteur radio 802.15.4 de ChipCon (CC2420) où 802.15.4 est une norme IEEE décrivant les couches physiques et MAC d'une radio basse puissance et de faible portée. Le CC2420 prend en charge un débit de 250 kb/s avec 16 canaux [65].
- Une antenne à montage en surface de 2,4 GHz qui offre une portée nominale d'environ 30 mètres avec une possibilité d'extension via l'ajout du connecteur SMA pour se connecter à une antenne externe.

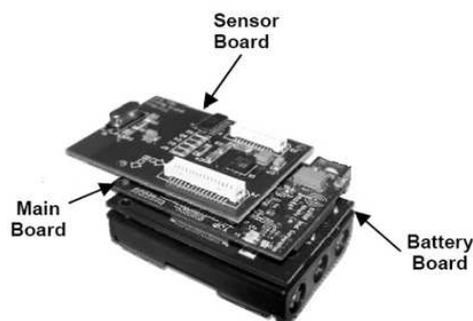


FIGURE 8.1 – Capteur Imote2

La plateforme Imote2 est modulaire et peut être empilée avec des cartes de capteur pour personnaliser le système à une application spécifique. Elle comporte les principales cartes suivante :

- **Imote2 Radio Processor Board (IPR2410)** : cette carte constitue le composant de base d'imote2. Elle inclut le processeur PXA271, une mémoire et un mini port USB permettant de programmer ou flasher le capteur;
- **Imote2 Basic Sensor Board (ITS400)** : représente l'unité de capture qui intègre quatre types de capteurs scalaires, à savoir : température, humidité, luminosité et accéléromètre tridimensionnel (X, Y et Z);
- **Imote2 Interface Board (IIB2400)** : utilisée pour le débogage et le chargement des codes dans les capteurs. Elle permet également d'établir une connexion permanente avec le PC via un port série afin d'interfacer le sink et récolter les informations recueillies par les différents capteurs du réseau;
- **Imote2 Battery Board (IBB2400)** : c'est une carte de batterie conçue pour alimenter le capteur via trois cellules de piles AAA, ou par un câble mini-USB connecté au PC.

TABEAU 8.1 – Caractéristiques principales d'un capteur Imote2

Processeur	PXA271
Mémoire SRAM	256 kB
Mémoire SDRAM	32 kB
Mémoire FLASH	32 kB
Radio	CC2420
Débit	250 Kb/s
Bande passante	2.4 GHz
Nombre de canaux	16
Portée maximale d'antenne	30 m
Connecteur PC	Port mini-USB
Dimensions (long.,larg.,épais.)	48mm, 36mm, 1.75mm
Nombre d'indicateur de statut LED	3 multi-couleur

Par ailleurs, les capteurs Imote2 ont été enrichis par la carte **Imote2 Multimedia Board (IMB400)** pour la capture du contenu multimédia (image, audio et vidéo) ainsi que la détection de mouvements. En outre, *IMB400* dispose d'un capteur infrarouge passif (*PIR*) pour se réveiller du mode veille si un mouvement est détecté, lui permettant ainsi de fonctionner comme un dispositif de faible puissance [66].

Les données capturées sont en format numérique et peuvent être utilisées à des fins de sauvegarde, transmission ou calcul interne au niveau du capteur.

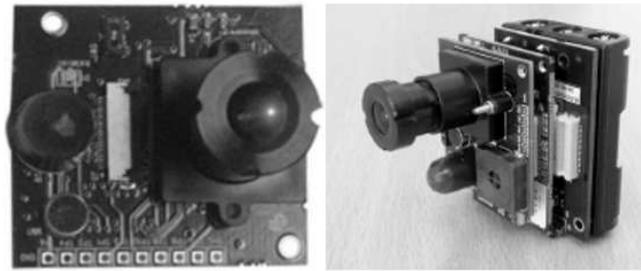


FIGURE 8.2 – Carte multimédia d’Imote2 (IMB400)

8.3 Architecture réseau

Les tests matériels ont été réalisés sur une architecture plate régulière, dans laquelle 27 nœuds intermédiaires et une paire (source,sink) ont été déployés comme illustré dans la figure 8.3. Tous les capteurs ont été flashés avec les mêmes paramètres d’initialisation (cycles des beacons, débit de transmission, nombre de chemins...etc) via leurs cartes *IPR2410* où nous avons utilisé un programme NesC comme module de base, contenant le cœur de fonctionnement des différents protocoles : EA-TPGF, AGEM et GNMFT. Les coordonnées géographiques ont été insérées également lors du flashage, du fait que les capteurs Imote2, ne disposent pas d’un outil de localisation tel que le GPS. Le tableau 8.2 récapitule les paramètres appliqués.

Un programme Java a été utilisé du côté du PC, employant un thread pour l’écoute du port série et le traitement des messages, relatifs aux bilans d’activités transmis par le sink. En effet, ce dernier, joue le rôle de passerelle via une connexion direct par câble USB.

TABLEAU 8.2 – Paramètres de tests utilisés

Type de capteur	Imote2
Couche MAC	CSMA-CA
Canal de transmission	Wireless Channel
Nombre de nœuds	29
Type de déploiement	Déterministe
Topologie	Plate (8m x 10m)
Portée de transmission	2 mètres
Bande passante	250 kb/s
Taille d’un paquet de données	28 octets
Taille de la file d’attente	30 paquets

Par ailleurs, pour la consommation d’énergie, nous avons utilisé le composant *DemoSensorP* [62], qui permet d’avoir les niveaux d’énergie des batteries via une interface *Read*.

Enfin, pour montrer l'efficacité de nos deux mécanismes de tolérance aux pannes (FMC et EPM) et de gestion d'interférence (NMM) décrits précédemment, nous avons provoqué les défaillances suivantes :

- extinction de nœuds ciblés, en affectant 40% des chemins opérationnels pendant la transmission des données;
- chargement des piles à 10% pour atteindre rapidement l'énergie seuil et déclenché par conséquent le mécanisme de prévention.

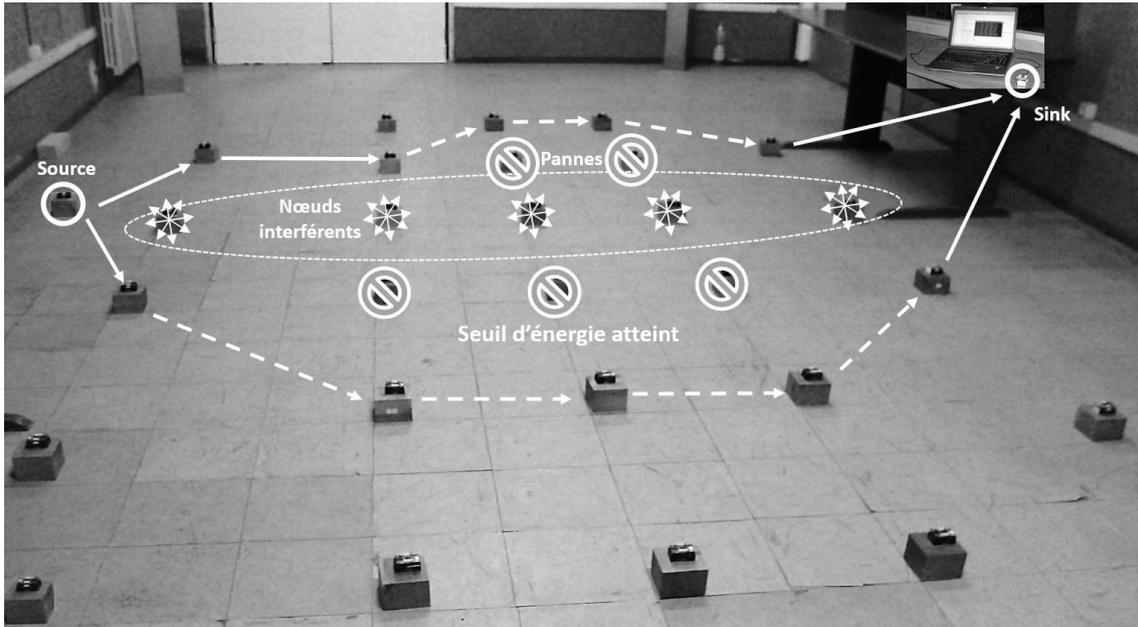


FIGURE 8.3 – Scène de déploiement

Néanmoins, durant la phase de tests des protocoles, la portée de transmission des capteurs (30m) était une difficulté, du fait que la salle mise à notre disposition était relativement petite (8m x 10m). Pour ce faire, nous avons réduit la puissance de transmission qui était réglable sur 8 niveaux et adopté une stratégie de voisinage basée sur la distance géographique entre les nœuds. En effet, si un nœud reçoit le paquet de données d'un voisin éloigné (distance voisin > distance limite), le paquet ne sera pas pris en compte. De plus, nous avons opté pour une taille des paquets de données plus petite que celle utilisée dans les simulations (64 octets au lieu de 128 octets), ce qui nous permet de diminuer leurs temps de traitement, notamment lors de la transmission et la réception au niveau MAC.

8.4 Résultats expérimentaux

L'évaluation des différents protocoles sur la scène de déploiement comprend l'impact du débit d'envoi sur la qualité des flux multimédia transmis. A cet effet, nous avons gardé les

mêmes métriques de performance mesurées dans la simulation mais en variant le débit de transmission de 20 à 45 (p/s) et en fixant le nombre de chemin à 2.

8.4.1 Taux de Délivrance

Nous constatons d'après les courbes de la figure 8.4, que les taux de succès des protocole EA-TPGF et AGEM sont inversement proportionnels au débit d'envoi, tandis que celle de GNMFT est relativement stable.

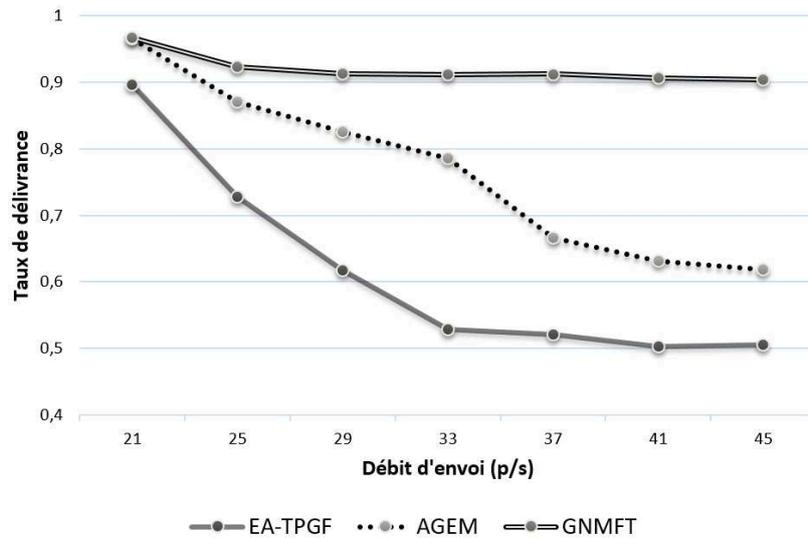


FIGURE 8.4 – Impact du débit d'envoi sur le taux de délivrance

La principale raison est due à l'absence de politique de maintenance de chemins et de gestion d'interférence dans EA-TPGF. Ce dernier, en présence de nœuds défaillants, ne bloque pas les chemins en ruptures, mais continue la transmission des flux sur les chemins défectueux. En outre, lors des nouvelles détections et après l'extinction de certains nœuds comme indiqué dans la figure 8.3, il route les paquets de données via des chemins interférents, ce qui augmente davantage les collisions et engendre une perte conséquente.

Du côté de AGEM, l'effet de congestion est clairement apparent au-delà de 33 p/s, ce qui entraîne le débordement des files d'attente. De plus, le mode de routage réactif intelligent employé, ne tient pas compte des distances qui séparent les chemins et par conséquent, face aux nombres réduits de capteurs, les routes empruntées sont très proches où un nombre important de paquets perdus est enregistré.

Le mécanisme tolérant aux pannes (*Faulty-paths Curative Mechanism*) utilisé permet en premier lieu de bloquer les chemins défectueux afin d'éviter les pertes précoces et de réparer localement et en temps réel les pannes soudaines durant la progression des paquets de données. D'autre part, le mécanisme de chemins non interférents (*Non-interfering Multipath*

Mechanism) assure un espacement entre les chemins construits, ce qui réduit également les pertes dues aux collisions et accroît le taux de réussite.

8.4.2 Energie Consommée

La figure 8.5 nous montre que les consommations énergétiques de AGEM et GNMFT sont moyennement équilibrées en raison des techniques adoptées. En effet, la fonction objective du choix du prochain saut qui prend en compte l'énergie résiduelle du voisin explique les ressemblances des dépenses. En revanche, certains nœuds dans AGEM consomment moins d'énergie et d'autres dépassent le seuil critique défini en essayant de contourner les trous. Tandis que, le mécanisme préventif de tolérance aux pannes (*Energy-efficient Preventive Mechanism*) utilisé par GNMFT garantit que l'énergie résiduelle restante des capteurs n'atteint pas le seuil limite, ce qui distribue les charges d'une manière uniforme.

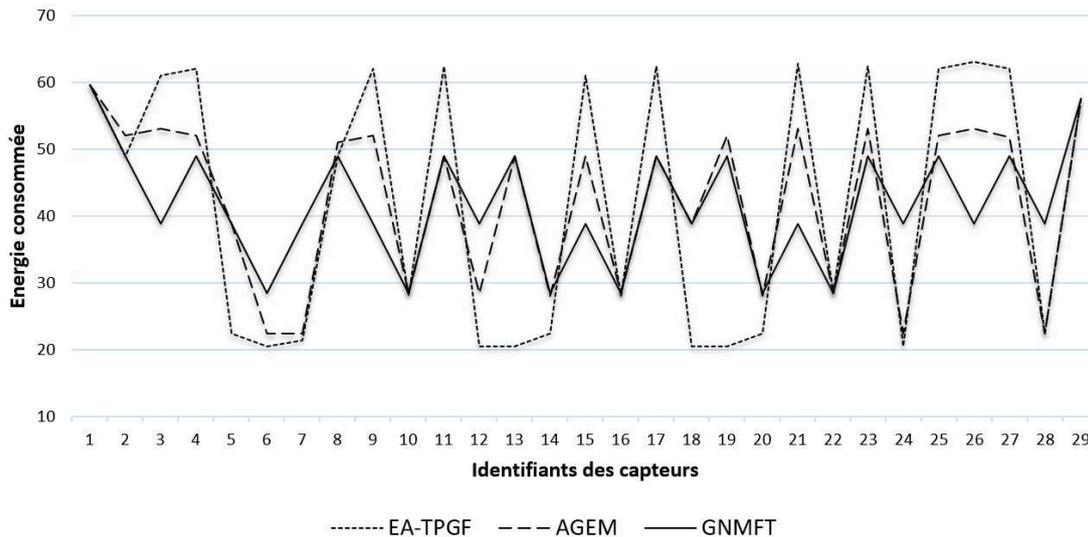


FIGURE 8.5 – Energie consommée après 20 détections

L'énergie consommée dans EA-TPGF est beaucoup moins équilibrée malgré que ce dernier tient compte de l'énergie résiduelle lors de la sélection du voisin de prochain saut. En effet, quand le nombre de nœuds est réduit (pannes occasionnées) et que certains ont été chargés à 10%, le protocole utilise les mêmes chemins optimaux, ce qui épuise rapidement les batteries des nœuds appartenant à ces chemins et présente des pics de consommation.

8.4.3 Délai Moyen de Bout-en-bout

Les délais moyens de bout-en-bout des trois protocoles sont proportionnels au débit d'envoi selon les courbes de la figure 8.6. Néanmoins, AGEM enregistre les délais les plus élevés en raison de son approche réactive de construction de chemins en temps réel et également

à cause de son mode marche arrière pour contourner les nœuds en panne. Cela augmente le temps d'attente dans les files et ralentit l'envoi des paquets de données.

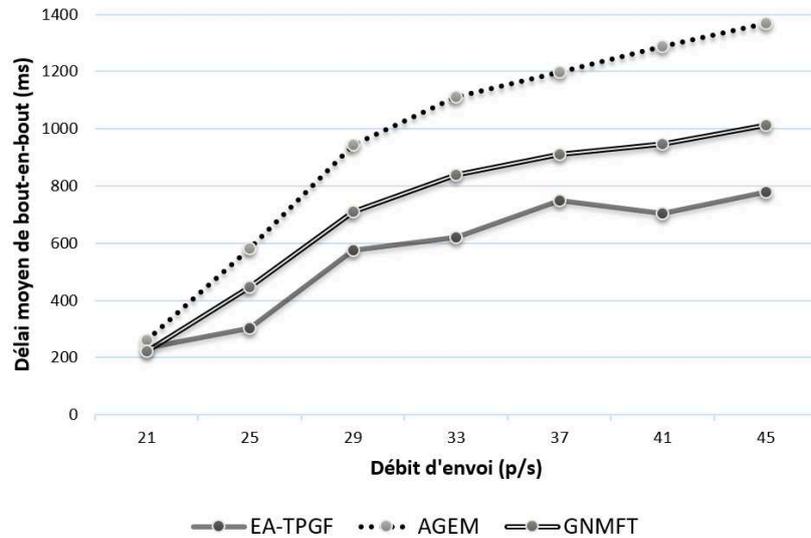


FIGURE 8.6 – Impact du débit d'envoi sur le délai moyen de bout-en-bout

Toutefois, en comparant les protocoles EA-TPGF et GNMFT, nous remarquons que les résultats de simulation ne s'accordent pas avec ceux de l'expérimentation, qui montrent que EA-TPGF est meilleur. Cela est dû principalement au nombre réduit de paquets reçus dans EA-TPGF, comme le confirme la figure 8.4 surtout à partir de 33 p/s et également grâce aux chemins de routages rapprochés en terme de distance en dépit des nœuds interférents.

En revanche, notre protocole qui emploie plus de chemins géographiquement écartés pour réduire autant que possible les collisions, sollicite plus de nœuds qui utilisent le mode CSMA/CA au niveau MAC. Par conséquent, met plus de temps pour accéder au canal de transmission, ce qui se répercute négativement sur le délai moyen de tous les paquets acheminés.

8.4.4 Facteur d'Equilibrage d'Energie

L'histogramme de la figure 8.7, indique le FEE de EA-TPGF enregistre la valeur la plus élevée après 10 événements et donc le plus faible en équilibrage d'énergie. Après 10 détections, le FEE diminue en raison du nombre réduit de nœuds et des niveaux très bas des batteries.

Par ailleurs, le FEE de AGEM est bien équilibré avec une légère évolution due aux écarts de consommation entre les nœuds après chaque événements. Ce dernier qui utilise un routage en ligne, recense plus de dépenses de certains nœuds opérationnels face aux trous dynamiques.

GNMFT présente le facteur d'équilibrage le moins évolué après les 20 détections, où à chaque détection, les routes établies changent selon les niveaux des batteries entre la source et le sink, ce qui répartit presque équitablement la charge dans réseau.

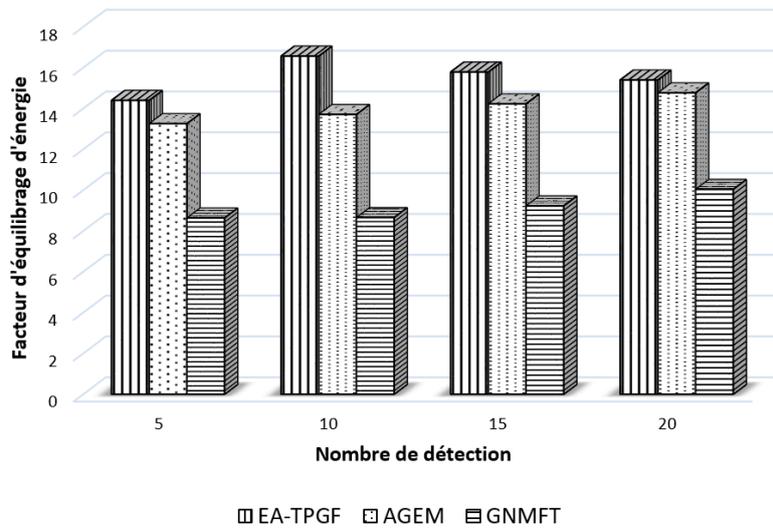


FIGURE 8.7 – Facteur d'équilibrage d'énergie

8.4.5 Débit de réception

Nous déduisons de la figure 8.8 que le débit de réception est proportionnel au débit d'envoi. En effet, les chemins maintenus par notre mécanisme curatif fournissent un taux de réussite élevé. Tandis que le taux de AGEM est relativement faible, en raison du débordement des files d'attente quand les trous sont détectés et beaucoup plus faible dans EA-TPGF qui véhicule le flux de données sur un nombre réduit de chemins géographiquement proches, ce qui entraîne des pertes importantes.

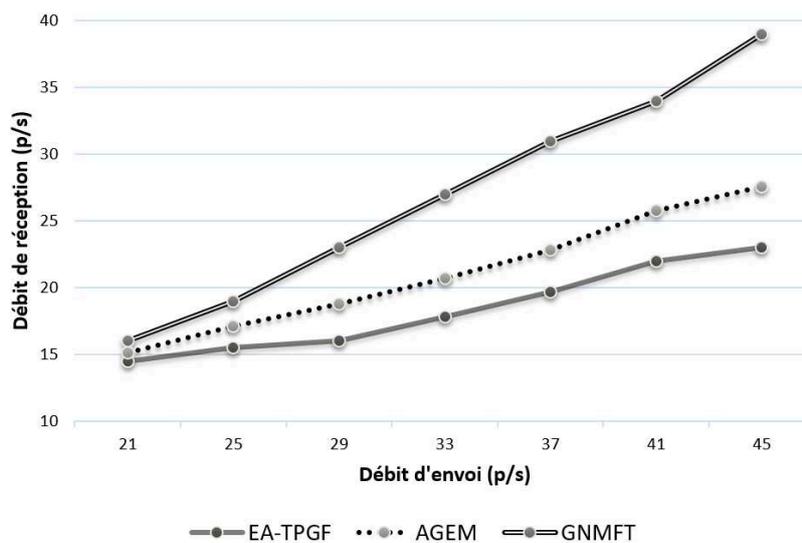


FIGURE 8.8 – impact du débit d'envoi sur le débit de réception

8.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la plateforme matérielle utilisée (Intel Mote 2) et l'architecture réseau employée pour les tests de performances à petit échelle sur un banc d'essai où nous avons déployé 29 capteurs dont une source et un sink d'une manière régulière.

En dépit de quelques contraintes liées au matériel, les résultats obtenus par expérimentation matérielle concordent avec ceux obtenus par simulation et montrent l'efficacité de notre protocole de routage géographique multi-chemins non-interférents basé sur une approche hybride et renforcé par ses mécanismes de tolérances aux pannes et de gestion d'interférence.

Conclusion générale et perspectives

Les travaux développés dans le cadre de cette thèse s'intéressent aux problèmes fondamentaux dans les réseaux de capteurs multimédia sans fil, à savoir : le routage adaptatif aux changements, l'équilibrage de charge dans le réseau, la tolérance des divers pannes, en particulier durant la transmission des données en temps-réel et la gestion des interférences entre les chemins adjacents du même flux ou dans un environnement multi-paires (source,sink).

A cet effet, nous avons axé nos travaux sur le développement d'un protocole de routage géographique tolérant aux pannes avec une livraison sur multi-chemins non-interférents, où nous lui avons griffé trois mécanisme. Ces derniers, peuvent être utilisés par tous les protocoles de routages géographiques.

Pour ce faire, nous avons en premier lieu, modifié la manière de sélection du prochain saut en utilisant une fonction objective multicritères (distance, énergie et puissance de réception). Puis, nous avons introduit une phase d'optimisation des routes construites et une approche adaptative gérant les transmissions simultanées provenant de plusieurs sources vers plusieurs sinks. Ensuite, nous avons modélisé le nombre des paquets perdus durant l'acheminement des paquets de données en temps réel et proposé dans ce contexte deux mécanismes de tolérance aux pannes. Le 1^{er} curatif pour la détection des ruptures soudaines des liens de communication avec réparation locale et le 2^{ème} préventif afin d'éviter l'épuisement précoce des batteries. Les deux mécanismes sont combinés avec une stratégie de basculement dynamique.

Par la suite, nous avons défini un modèle d'interférence et un 3^{ème} mécanisme permettant de construire des trajets non interférents lors la phase de découverte afin de limiter les interactions entre les routes adjacentes. De plus, nous avons défini un modèle de perte de chemins dans un environnement multi-paires (source,sink) et introduit une nouvelle métrique dans la fonction objective, relative aux capteurs actifs qui interfèrent sur le nœud courant.

Enfin, le protocole proposé a été implémenté sous TinyOS et ses performances ont été évaluées à grande échelle, via le simulateur TOSSIM et à petite échelle par expérimentation matérielle dans des capteurs réels de type Imote2. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de nos approches employées, en termes de taux de délivrance, de délai de transmission de bout-

en-bout et de consommation énergétique.

Par ailleurs, les nombreuses constatations relevées ouvrent plusieurs pistes d'investigation pour d'éventuels travaux futurs, à savoir :

1. réalisation du déploiement déterministe dans une région plus étendue (*outdoor*) afin d'éliminer la contrainte de diffusion rencontrée durant les tests matériels;
2. injection d'un module de pondération pour attribuer des niveaux de priorité à chaque type de trafic (image, audio, vidéo ou scalaire) selon l'exigence requise et réduire ainsi la congestion;
3. utilisation des méthodes d'accès au canal adaptées à la transmission multi-chemins et le haut débit telles TDMA et FDMA. TDMA permet d'effectuer un multiplexage temporel dans les régions où la densité du trafic est importante, ce qui fournit différents créneaux temporels à différents flux de données. Par ailleurs, FDMA permet d'attribuer une fréquence de transmission à chaque route et limiter ainsi les interférences entre les chemins adjacents;
4. établissement d'une approche d'ordonnancement d'activité localisée au niveau de chaque nœud durant la livraison des paquets de données. Le but étant de coordonner les envois où chaque nœud décide de sa propre activité en se basant sur l'observation de ses voisins, afin de limiter les collisions pendant les transmissions multiples où les chemins de routages se chevauchent d'une manière croisée.

Annexe A

Pseudo-codes

A.1 Geographic Multipath

Algorithm 1 Réception GreedyForwarding

Prédécesseur=Emetteur

if (IdNoeud = IdSink) **then**

 Envoyer Optimisation au Prédécesseur

else

 copier le chemin (IdSource, IdSink, IdChemin, NumEtiquète)

 NumEtiquète - -

 EtatNoeud = Actif

 Appel GreedyForwarding

end if

Algorithm 2 Envoi GreedyForwarding

```
if (IdNoeud = IdSource) then  
    IDChemin ++  
    NumEtiquète = ValeurMax  
end if  
Choisir le Prochain Saut (PS)  
Successeur = PS;  
if (PS=∅) then  
    if (IdNoeud=IdSource) then  
        if (NombreChemin ≠ 0) then  
            Début d'envoi de données  
        else  
            Fin du programme (aucun chemin trouvé)  
        end if  
    else  
        Envoyer WalkingBack au prédécesseur  
    end if  
else  
    Envoyer GreedyForwarding au PS  
end if
```

Algorithm 3 Réception WalkingBack

```
Mise à jour des tables de voisinages  
Appel GreedyForwarding
```

Algorithm 4 Réception Optimization

```
NœudOptimisé = Vrai
SuccesseurOptimisé = Emetteur
if (Successeur ≠ Emetteur) then
    Envoyer Liberation au Successeur
end if
if (IdNoeud=IdSource) then
    NombreChemin ++
    if (NombreChemin est atteint) then
        Début d'envoi de données
    else
        Appel MsgGreedyForwarding
    end if
else
    Envoyer Optimisation au PrédécesseurOptimisé (NumEtiquète la plus grande)
end if
```

Algorithm 5 Réception Liberation

```
if (NœudOptimisé) then
    Fin de la libération
else
    Envoyer Liberation au Successeur
    EtatNoeud=Inactif (Libérer le nœud courant)
end if
```

A.2 Faulty-paths Curative Mechanism

Algorithm 6 Réception message de données

Envoi Ack au prédécesseur
Envoi Données au successeur
if (! Ack) **then**
 if (IdNoeud = IdSource) **then**
 bloquer le chemin
 else
 Envoyer Blocage au prédécesseur
 end if
 EtiquèteMaintenance = EtiquèteSuccesseur
 Appel GreedyForwarding (Type maintenance)
end if

Algorithm 7 Envoi GreedyForwarding (Type maintenance)

Choisir le Prochain Saut (PS)
if (PS = \emptyset) **then**
 if (IdNoeud = IdSource) **then**
 Echec maintenance
 else
 Envoyer WalkingBack au prédécesseur
 end if
else
 Envoyer GreedyForwarding au PS
 Successeur = PS
end if

Algorithm 8 Réception Envoi GreedyForwarding (Type maintenance)

```
if ( IdNoeud.Chemin(IdChemin,IdSource,IdSink)=Emetteur.Chemin(IdChemin,IdSource,IdSink)
ou (IdNoeud = IdSink ou NumEtiquète < EtiquèteMaintenance) ) then
    Envoyer Liberation au Prédécesseur
    Prédécesseur=Emetteur
    Envoyer Rétablissement au Prédécesseur
else
    Prédécesseur=Emetteur
    Copier le Chemin (IdChemin, IdSource, IdSink, NumEtiquète, EtiquèteMaintenance)
    NumEtiquète - -
    EtatNoeud = Actif
    Appel GreedyForwarding
end if
```

Algorithm 9 Réception Blocage

```
if (IdNoeud = IdSource) then
    bloquer le chemin
else
    Envoyer Blocage au prédécesseur
end if
```

Algorithm 10 Réception Rétablissement

```
Successeur = Emetteur
NumEtiquète = Emetteur.Etiquète + 1
if ( IdNoeud=IdSource) then
    débloquer le chemin
else
    Envoyer Rétablissement au PrédécesseurOptimisé (NumEtiquète la plus grande
end if
```

A.3 Energy-efficient Preventive Mechanism

Algorithm 11 Réception AlerteEnergie

Marquer le nœud courant PNV (Prédécesseur Noeud Vulnérable)

EtiquèteMaintenance = EtiquèteSuccesseur

Mise à jour des tables de voisinages

Appel GreedyForwarding

Algorithm 12 Réception Liberation

if (EnergieNoeud \geq Seuil) **then**

Envoyer Liberation au Prédécesseur

EtatNoeud = Inactif (Libérer le nœud courant)

end if

Algorithm 13 Réception Basculement

Successeur= Emetteur

NumEtiquète = Emetteur.Etiquète + 1

if (PNV) **then**

Basculer vers le nouveau chemin

else

Envoyer Basculement au PrédécesseurOptimisé (NumEtiquète la plus grande)

end if

Algorithm 14 Envoi GreedyForwarding (Type maintenance)

Les mêmes étapes utilisées dans (Faulty-paths Curative Mechanism) à l'exception du choix de PS qui se fait selon la fonction objective (distance, énergie, puissance de réception)

Algorithm 15 Réception GreedyForwarding (Type maintenance)

Les mêmes étapes utilisées dans (Faulty-paths Curative Mechanism) à l'exception du message de Basculement au lieu de Rétablissement

A.4 Non-interfering Multipath Mechanism

Algorithm 16 Fonction de choix de prochain saut PS

```
for (i = 0 à MaxVoisins) do  
    if ((interference=FAUX) ou ((interference=VRAI) et (TableVoisins(i).interferant=FAUX)))  
        then  
            Choisir le PS qui à la meilleure fonction objective.  
        end if  
end for
```

Algorithm 17 Sur-écoute Optimization

```
if (IdNoeud  $\neq$  IdSink et NœudOptimisé=FAUX et Emetteur  $\neq$  IdSink) then  
    if (NoeudIntererant = FAUX) then  
        NoeudInterferant=VRAI  
        Cpt++  
        Diffusion WarningInterference  
    else  
        Cpt++  
    end if  
end if
```

Algorithm 18 Réception WarningInterference

```
if ( TableVoisin [indice(Emetteur)].interferant=FAUX ) then  
    TableVoisin [indice(Emetteur)].interferant=VRAI  
    interference = VRAI  
end if
```

Algorithm 19 Envoi GreedyForwarding

```
if (IdNoeud=IdSource ) then
    IdChemin ++
    NumEtiquète=ValeurMax
end if
Choisir le Prochain Saut (PS(VRAI))
if (PS=∅) then
    Choisir le Prochain Saut(PS(FAUX))
    Successeur =PS
end if
if (PS=∅) then
    if (IdNoeud = IdSource) then
        if (NombreChemin ≠ 0) then
            Début d'envoi de données
        else
            Fin du programme (aucun chemin trouvé)
        end if
    else
        Envoyer WalkingBack au prédécesseur
    end if
else
    Envoyer GreedyForwarding au PS
end if
```

Algorithm 20 Sur-écoute Liberation

```
if (NoeudInterferant=VRAI) then
    Cpt- -
    if (Cpt=0) then
        Diffusion EndInterference
    end if
end if
```

Annexe B

Format de la trame et taille du paquet multimédia

B.1 Format de la trame *ChipCon Radio CC2420*

Le format de la trame utilisée par l'émetteur/récepteur radio-fréquence ChipCon CC2420 qui convient avec la norme IEEE 802.15.4 est donné dans la figure B.1

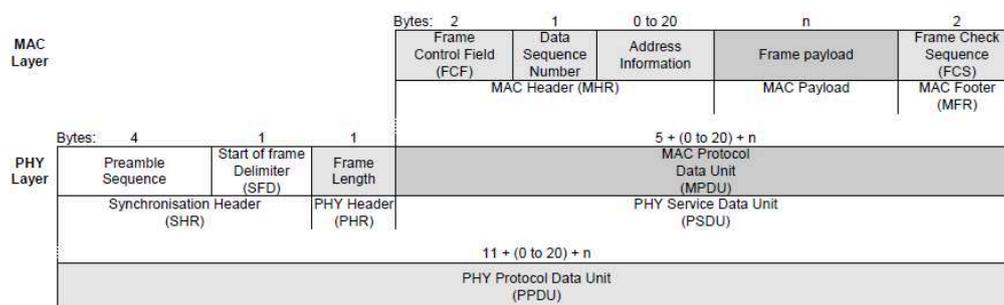


FIGURE B.1 – Format de la trame IEEE 802.15.4 [67]

La taille du MPDU (*Mac Protocol Data Unit*) plus l'octet de la longueur de la trame (*Frame Length*) constitue la portion concernée par les files d'attente d'émission (*TXFIFO*) et de réception (*RXFIFO*), qui ont une capacité de 128 octet chacune. En effet, si la taille de cette portion dépasse la capacité des files d'attentes, les octets en débordement seront perdus.

B.2 Taille du paquet multimédia utilisé dans la transmission

Etant donné que les files d'attentes d'émission/réception radio de la plateforme cible ont une taille limitée à 128 octets. Nous avons opté pour le choix de la plus grande taille du paquet multimédia dans la limite de l'espace offert afin d'obtenir les meilleures performances.

La structure du paquet, tel décrit dans le fichier *CC2420.h* est la suivante :

```
typedef nx_struct cc2420_packet_t {  
    cc2420_header_t packet;  
    nx_uint8_t data[];  
} cc2420_packet_t;
```

Sachant que la taille du *Header* est de 11 octets, la taille restante allouée à la charge utile (*Data Payload*) est de 117 octets (128-11). Par ailleurs, comme la taille par défaut de la charge utile dans Tinyos est de 28 octets, nous avons ajouter ligne de commande (`MSG_SIZE = 117`) dans le fichier *makefile* du programme TinyOS afin d'augmenter la charge à 117 octet.

Bibliographie

- [1] I. F. Akyildiz, T. Melodia, and K. R. Chowdhury. Wireless multimedia sensor networks : Applications and year=2008, volume=96, number=10, pages=1588-1605, month=Oct,. *Proceedings of the IEEE*. [10](#), [16](#)
- [2] Yahya Esmail Osais, Marc St-Hilaire, and R Yu Fei. Directional sensor placement with optimal sensing range, field of view and orientation. *Mobile Networks and Applications*, 15(2) :216–225, 2010. [10](#)
- [3] Luis Cobo Campo. *Gestion de la qualité de service et planification optimale de réseaux de capteurs multimédia sans fil*. PhD thesis, École Polytechnique de Montréal, 2011. [11](#), [19](#)
- [4] 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 Tutorials*, pages 1–34, Jan 2017. [13](#), [55](#)
- [5] Bo-Yi Li and Po-Jen Chuang. Geographic energy-aware non-interfering multipath routing for multimedia transmission in wireless sensor networks. *Information Sciences*, 249 :24–37, 2013. [16](#), [35](#), [54](#), [55](#), [100](#)
- [6] I. Jamil, L. Cariou, and J. F. Héland. Carrier sensing-aware rate control mechanism for future efficient wlans. In *2014 International Conference and Workshop on the Network of the Future (NOF)*, pages 1–6, Dec 2014. [17](#), [100](#)
- [7] Marjan Radi, Behnam Dezfouli, Kamalrulnizam Abu Bakar, and Malrey Lee. Multipath routing in wireless sensor networks : survey and research challenges. *Sensors*, 12(1) :650–685, 2012. [26](#), [38](#), [40](#)
- [8] A Jayashree, GS Biradar, and VD Mytri. Review of multipath routing protocols in wireless multimedia sensor network—a survey. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3(7) :1–9, 2012. [28](#)
- [9] Shailendra Aswale and Vijay R Ghorpade. Survey of qos routing protocols in wireless multimedia sensor networks. *Journal of computer Networks and communications*, 2015 :7, 2015. [29](#), [65](#)

- [10] M. Xiao, J. Wu, and L. Huang. Time-sensitive utility-based single-copy routing in low-duty-cycle wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 26(5) :1452–1465, May 2015. [33](#)
- [11] M. Gorlatova, A. Wallwater, and G. Zussman. Networking low-power energy harvesting devices : Measurements and algorithms. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 12(9) :1853–1865, Sept 2013. [34](#)
- [12] Hang Shen and Guangwei Bai. Routing in wireless multimedia sensor networks : A survey and challenges ahead. 71, 05 2016. [34](#), [40](#), [100](#)
- [13] Lei Shu, Yan Zhang, Zhiwen Yu, Laurence T Yang, Manfred Hauswirth, and Naixue Xiong. Context-aware cross-layer optimized video streaming in wireless multimedia sensor networks. *The Journal of Supercomputing*, 54(1) :94–121, 2010. [35](#)
- [14] I. Bennis, H. Fouchal, O. Zytoune, and D. Aboutajdine. An evaluation of the tpgf protocol implementation over ns-2. In *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 428–433, June 2014. [35](#), [66](#)
- [15] Amir Hossein Mohajerzadeh, Mohammad Hossein Yaghmaee, Najmeh Najmi Toroghi, Sousan Parvizy, and Abdoreza Hassani Torshizi. Mreep : a qos based routing protocol for wireless multimedia sensor networks. In *Electrical Engineering (ICEE), 2011 19th Iranian Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2011. [35](#)
- [16] 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 *Computer Research and Development (ICCRD), 2011 3rd International Conference on*, volume 4, pages 229–233. IEEE, 2011. [35](#)
- [17] Vijay Ukani, Ankit Kothari, and Tanish Zaveri. An energy efficient routing protocol for wireless multimedia sensor network. In *Devices, Circuits and Communications (ICDCCom), 2014 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2014. [35](#)
- [18] Petros Spachos, Dimitris Toumpakaris, and Dimitrios Hatzinakos. Qos and energy-aware dynamic routing in wireless multimedia sensor networks. In *Communications (ICC), 2015 IEEE International Conference on*, pages 6935–6940. IEEE, 2015. [35](#), [66](#)
- [19] Naércio Magaia, Nuno Horta, Rui Neves, Paulo Rogério Pereira, and Miguel Correia. A multi-objective routing algorithm for wireless multimedia sensor networks. *Applied Soft Computing*, 30 :104–112, 2015. [35](#)

- [20] Ulka S Padwalkar and DD Ambawade. Mmre-aomdv based energy efficient (maee) routing protocol for wmsns. In *Communication, Information & Computing Technology (ICCICT), 2015 International Conference on*, pages 1–7. IEEE, 2015. 35
- [21] K Malarvizhi, M Brindha, and Madhusudan Kumar. Evaluation of energy efficient routing in wireless multimedia sensor networks. In *Electronics and Communication Systems (ICECS), 2015 2nd International Conference on*, pages 1387–1391. IEEE, 2015. 35
- [22] Zara Hamid, Faisal Bashir Hussain, and Jae-Young Pyun. Delay and link utilization aware routing protocol for wireless multimedia sensor networks. *Multimedia Tools and Applications*, 75(14) :8195–8216, 2016. 35
- [23] Samir Medjiah, Toufik Ahmed, and Francine Krief. Agem : adaptive greedy-compass energy-aware multipath routing protocol for wmsns. In *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2010 7th IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2010. 35, 66
- [24] Si-Yeong Bae, Sung-Keun Lee, Jin-Gwang Koh, and Kyoung-Wook Park. Qos routing method considering congestion in wmsns. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 9(4) :309–316, 2014. 35
- [25] Junfeng Wang, Yin Zhang, Jialun Wang, Yujun Ma, and Min Chen. Pwdgr : pair-wise directional geographical routing based on wireless sensor network. *IEEE internet of things journal*, 2(1) :14–22, 2015. 35
- [26] Babak Namazi and Karim Faez. Power-aware qos routing for wireless multimedia sensor networks. In *Electrical Engineering (ICEE), 2013 21st Iranian Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2013. 35
- [27] Ziad Serhan and Wafaa Bou Diab. Energy-efficient qos routing in wireless multimedia sensor networks. In *Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2015 IEEE 29th International Conference on*, pages 223–230. IEEE, 2015. 35, 66
- [28] J. Zhang, F. Ren, S. Gao, H. Yang, and C. Lin. Dynamic routing for data integrity and delay differentiated services in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 14(2) :328–343, Feb 2015. 35
- [29] Mohammad Hammoudeh and Robert Newman. Adaptive routing in wireless sensor networks : Qos optimisation for enhanced application performance. *Information Fusion*, 22 :3–15, 2015. 35
- [30] Hang Shen, Guangwei Bai, Zhenmin Tang, and Lu Zhao. Qmor : Qos-aware multi-sink opportunistic routing for wireless multimedia sensor networks. *Wireless personal communications*, 75(2) :1307–1330, 2014. 35

- [31] Rui Dai, Pu Wang, and Ian F Akyildiz. Correlation-aware qos routing with differential coding for wireless video sensor networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 14(5) :1469–1479, 2012. [35](#)
- [32] Ashish Jaiswal, Santhosha Rao, and Kumara Shama. Application aware energy efficient geographic greedy forwarding in wireless multimedia sensor networks. *Int. J. Eng. Adv. Technol*, 1(5) :222–227, 2012. [35](#)
- [33] Denis do Rosário, Kássio Machado, Antônio Abelém, Dionne Monteiro, and Eduardo Cerqueira. Recent advances and challenges in wireless multimedia sensor networks. In *Mobile Multimedia-User and Technology Perspectives*. InTech, 2012. [35](#)
- [34] Jayashree Agarkhed, GS Biradar, and VD Mytri. Energy efficient qos routing in multi-sink wireless multimedia sensor networks. *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, 12(5) :25, 2012. [35](#), [66](#)
- [35] Ilnaz Nikseresht, Hamed Yousefi, Ali Movaghar, and Mohammad Khansari. Interference-aware multipath routing for video delivery in wireless multimedia sensor networks. In *Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW), 2012 32nd International Conference on*, pages 216–221. IEEE, 2012. [35](#)
- [36] Ali Ghaffari and Vida Aghakhanloye Takanloo. Qos-based routing protocol with load balancing for wireless multimedia sensor networks using genetic algorithm. *World Appl. Sci. J*, 15(12) :1659–1666, 2011. [35](#)
- [37] Islam T Almalkawi, Manel Guerrero Zapata, and Jamal N Al-Karaki. A cross-layer-based clustered multipath routing with qos-aware scheduling for wireless multimedia sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 8(5) :392515, 2012. [35](#)
- [38] Rana E Ahmed. A fault-tolerant, energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks. In *Information and Communication Technology Research (ICTRC), 2015 International Conference on*, pages 175–178. IEEE, 2015. [39](#), [69](#)
- [39] Mohamed Nacer Bouatit, Selma Boumerdassi, and Adel Djama. A geographic multipath routing protocol for wireless multimedia sensor networks. In *International Conference on Mobile, Secure and Programmable Networking*, pages 99–108. Springer, June 2016. [43](#), [57](#)
- [40] G. Borradaile, P. N. Klein, S. Mozes, Y. Nussbaum, and C. Wulff-Nilsen. Multiple-source multiple-sink maximum flow in directed planar graphs in near-linear time. In *2011 IEEE 52nd Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, pages 170–179, Oct 2011. [55](#)

- [41] M. N. Bouatit, S. Boumerdassi, P. Minet, and A. Djama. Fault-tolerant mechanism for multimedia transmission in wireless sensor networks. In *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pages 1–6, Sept 2016. [61](#), [73](#), [74](#), [105](#)
- [42] Sourabh Dave and Abhishek Raghuvanshi. Fault tolerance techniques in distributed system. *IJEIR*, 1(2) :124–130, 2012. [64](#)
- [43] Challal Yacine. Réseaux de capteurs sans fils, Mis en ligne le 18/11/2008, consulté le 30/04/2018. [64](#), [104](#)
- [44] M. N. Bouatit, S. Boumerdassi, A. Djama, and R. H. Milocco. Energy-efficient preventive mechanism for fault tolerance in wireless multimedia sensor networks. In *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pages 1–5, Sept 2017. [65](#), [73](#), [74](#)
- [45] T. Bernard and H. Fouchal. A low energy consumption mac protocol for wsn. In *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 533–537, June 2012. [65](#)
- [46] Petros Spachos, Dimitris Toumpakaris, and Dimitrios Hatzinakos. Qos and energy-aware dynamic routing in wireless multimedia sensor networks. In *Communications (ICC), 2015 IEEE International Conference on*, pages 6935–6940. IEEE, 2015. [66](#)
- [47] T. Mulugeta, L. Shu, M. Hauswirth, M. Chen, T. Hara, and S. Nishio. Secured two phase geographic forwarding protocol in wireless multimedia sensor networks. In *2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6, Dec 2010. [66](#)
- [48] B. Yahya and J. Ben-Othman. An energy efficient and qos aware multipath routing protocol for wireless sensor networks. In *2009 IEEE 34th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pages 93–100, Oct 2009. [66](#)
- [49] A. V. Sutagundar, S. S. Manvi, and K. B. Balavalad. Energy efficient multipath routing protocol for wmsns. *International Journal of Computer and Electrical Engineering(IJCEE)*, 2(3) :503, 2010. [66](#)
- [50] Y. Sun, H. Luo, and S. K. Das. A trust-based framework for fault-tolerant data aggregation in wireless multimedia sensor networks. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing (TDSC)*, 9(6) :785–797, Nov 2012. [66](#), [70](#)
- [51] A. Ahmed, K. A. Bakar, M. I. Channa, K. Haseeb, and A. W. Khan. Terp : A trust and energy aware routing protocol for wireless sensor network. *IEEE Sensors Journal*, 15(12) :6962–6972, Dec 2015. [67](#), [70](#)
- [52] Kun Wang, Lei Wang, Can Ma, Lei Shu, and Joel Rodrigues. Geographic routing in random duty-cycled wireless multimedia sensor networks. In *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2010 IEEE*, pages 230–234. IEEE, 2010. [69](#)

- [53] D. B. Johnson and D. A. Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In *Mobile computing*, pages 153–181. Springer, 1996. [69](#)
- [54] C. Kavitha and K. V. Viswanatha. An energy efficient fault tolerant multipath (eefm) routing protocol for wireless sensor networks. In *Advance Computing Conference, 2009. IACC 2009. IEEE International*, pages 746–751, March 2009. [69](#)
- [55] N. Ahmed, S. S. Kanhere, and S. Jha. A pragmatic approach to area coverage in hybrid wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, pages 23–45, 2011. [70](#)
- [56] S. Ozdemir. Functional reputation based data aggregation for wireless sensor networks. In *2008 IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, pages 592–597, Oct 2008. [70](#)
- [57] G. Han, J. Jiang, L. Shu, J. Niu., and H. C. Chao. Management and applications of trust in wireless sensor networks : A survey. *J. Comput. Syst. Sci.*, 80(3) :602–617, 2014. [70](#)
- [58] M. N. Bouatit, S. Boumerdassi, and A. Djama. Experimental evaluation of fault-tolerant mechanisms over imote2 platform. In *2018 15th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, pages 1–4, Jan 2018. [73](#)
- [59] Nesrine Ouferhat. *Une approche pour le routage adaptatif avec économie d'énergie et optimisation du délai dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Paris Est, 2009. [74](#), [75](#)
- [60] 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 (HICSS)*, pages 10 pp. vol.2–, Jan 2000. [75](#)
- [61] Wikipedia. Friis transmission equation, Mis en ligne le 18/11/2008, consulté le 30/04/2018. [78](#)
- [62] P. Levis and D. Gay. *TinyOS Programming*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 1st edition, 2009. [104](#), [105](#), [106](#), [126](#)
- [63] P. Levis, N. Lee, M. Welsh, and D. Culler. Tossim : Accurate and scalable simulation of entire tinyos applications. In *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 126–137, 2003. [104](#), [109](#), [110](#)
- [64] E. Perla, A.O Cath, R.S Carbajo, M. Huggard, and C.M. Goldrick. Powertossim z : realistic energy modelling for wireless sensor network environments. In *Proceedings of the 3rd ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks (MSWIM)*, pages 35–42. ACM, 2008. [109](#)

- [65] Crossbow. *Imote2.Builder Kit Manual*. Crossbow Technology, California, USA, 2008. [124](#)
- [66] Crossbow. Imote2 multimedia board - imb400, Sept 2016. [125](#)
- [67] Texas Instruments. *2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver*. Dallas, Texas USA, 2013. [X](#)

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 RCSF**Abstract :**

Multimedia applications in WSN, convey large data, which require high transmission rate and intensive treatment and therefore high energy consumption. Effectively transmit these heterogeneous flows, with limited resources, while ensuring their reliability and guaranteeing QoS requirements, to deal with failures that can occur in real time, especially in critical contexts and faulty networks, remains an open scientific problem. That's why, in this thesis, we interested on aspects related to: routing, load balancing, fault tolerance and interference management and developed a Geographic Non-interfering Multipath Fault Tolerant routing protocol called GNMFT.

First, we improved node's selection mode, to deal with *Local Minimum* problem, where a multi-criteria objective function (distance, energy and reception power) related to next-hop choice was defined. Then, we introduced an optimization phase and an adaptive approach to manage simultaneous traffic transmissions. Subsequently, we oriented towards fault tolerance, to ensure transmitted data reliability and network connectivity. To this end, we modeled the number of lost packets during package delivery and proposed two mechanisms combined with a dynamic failover strategy. The curative is used when sudden failures occurs and the preventive one to anticipate batteries depletion. Finally, we presented an interference model and a third mechanism that limits interactions between adjacent links. In addition, we defined a path loss model in a multipairs environment (source, sink) where we computed error probability coefficient. At the end, a new metric has been added in the objective function, related to noise sum of the active sensors that interferes on the current node.

Obtained results show the effectiveness of the proposed approaches that have been studied and validated both by simulation and on an experimental testbed.

Keywords : Wireless Multimedia Sensors Networks, Geographic routing, Multipath transmission, Fault-tolerance, Load balancing, Interferences.

Résumé:

Les applications multimédias dans les RCSF, véhiculent des données volumineuses, qui nécessitent un taux de transmission élevé et un traitement intensif et par conséquent une consommation d'énergie importante. Transmettre efficacement avec les ressources limitées, ces flux hétérogènes, tout en assurant leur fiabilité et garantir les exigences de QoS, face aux défaillances qui peuvent surgir en temps réel, notamment dans les contextes critiques et les réseaux défectueux, demeure un verrou scientifique ouvert. C'est pourquoi, dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés aux aspects liés : au routage, à l'équilibrage de charge, à la tolérance aux pannes et à la gestion des interférences où nous avons développé un protocole de routage, baptisé GNMFT (*Geographic Non-interfering Multipath Fault Tolerant*).

En premier lieu, nous avons amélioré le mode de sélection des nœuds, pour faire face au problème du *Minimum-Local* où une fonction objective multicritères (distance, énergie et puissance de réception) relative au choix du prochain saut a été définie. Puis, nous avons introduit une phase d'optimisation des chemins construits et une approche adaptative gérant les transmissions simultanées. Par la suite, nous nous sommes orientés vers la tolérance aux pannes, pour assurer la fiabilité des données transmises ainsi que la connectivité du réseau. Pour ce faire, nous avons modélisé le nombre des paquets perdus durant la livraison et proposé deux mécanismes combinés avec une stratégie de basculement dynamique. Le curatif pour répare les défaillances soudaines et le préventif anticipe l'épuisement des batteries. Enfin, nous avons présenté un modèle d'interférence et un troisième mécanisme qui limite les interactions entre les routes adjacentes. De plus, nous avons défini un modèle de perte de chemins dans un environnement multi-paires (source,sink) où nous avons calculé le coefficient de probabilité d'erreur. A l'issu, une nouvelle métrique a été ajouté dans la fonction objective, relative à la somme des bruits des capteurs actifs qui interfèrent sur le nœud courant.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité des approches proposées qui ont été étudiées et validées à la fois par simulation et sur un banc d'essai expérimental.

Mots clés : Réseau de Capteur Multimédia Sans Fil, Routage géographique, Transmission multi-chemins, Tolérance aux pannes, Equilibrage de charge, Interférences.