

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de recherche : Centre de Recherche Rabat Information Technology

Structure de Recherche : Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications

Discipline : Sciences de l'ingénieur

Spécialité : Informatique et télécommunications

Présentée et soutenue le 05/10/2019 par :

Imad IALA

Contributions aux protocoles MAC déterministes dédiés aux Réseaux de Capteurs Sans Fil

JURY

| | | | |
|---------------------|-----|---|----------------------|
| M. Mohamed OUADOU | PES | Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V | Président |
| M. Mohammed RZIZA | PES | Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V | Directeur de thèse |
| M. Ouadoudi ZYTOUNE | PH | Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Kénitra, Université Ibn Tofail | Co-Encadrant |
| M. Khalid MINAOUI | PH | Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V | Rapporteur/Examineur |
| M. Youssef FAKHRI | PH | Faculté des Sciences de Kénitra, Université Ibn Tofail | Rapporteur/Examineur |
| Mme. Dounia LOTFI | PH | Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V | Examinatrice |

Année Universitaire : 2019/2020



AVANT-PROPOS

Les travaux présentés dans ce mémoire sont effectués au Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications (LRIT), à la Faculté des Sciences de Rabat (FSR), sous la direction des professeurs, feu Driss ABOUTAJDINE, et Mohammed RZIZA, et l'encadrement du professeur Ouadoudi ZYTOUNE.

Tout au long de notre vie, nous rencontrons des personnes qui marqueront d'une façon ou d'une autre notre parcours. Pour ma part, j'ai eu l'honneur d'avoir sur mon trajet éducatif des professeurs, qui ont su marquer mon cœur à jamais. Ces personnes exceptionnelles sont : feu M. Driss ABOUTAJDINE, M. Mohamed OUADOU, et M. Ouadoudi ZYTOUNE.

J'exprime aussi ma reconnaissance au professeur **Mohammed RZIZA**, professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences de Rabat, pour avoir accepté de reprendre le relai de ma thèse, et de m'avoir accordé son temps, malgré ses nombreuses occupations, pour mener à terme cette thèse de doctorat.

J'exprime aussi mes remerciements à mon encadrant le professeur **Ouadoudi ZYTOUNE**, professeur d'habilité à l'école nationale des sciences appliquées de Kénitra, sans qui ce travail n'aurait jamais été existé. M. ZYTOUNE avait une façon distinguée de rendre les problèmes de recherche simples et intéressantes. Il m'a vraiment fait découvrir le monde de la recherche scientifique sous des angles positifs et efficaces. Je le remercie aussi infiniment pour ses précieux conseils qui m'ont énormément servi lors de mon parcours de doctorat.

Je voudrais également exprimer ma gratitude à M **Mohamed OUADOU**, professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences de Rabat. Ce professeur inoubliable a toujours aidé chacun de ses étudiants différemment, car chacun a ses propres besoins. Chaque jour, il était disponible pour nous aider. Je n'ai jamais eu l'impression qu'on le dérangeait avec nos problèmes. M. OUADOU avait une grande oreille ouverte pour nous écouter. Il écoutait ses étudiants comme un père le ferait pour ses enfants. Il était toujours souriant et heureux de faire son travail. Je le remercie aussi infiniment pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse de doctorat malgré ses nombreuses occupations. Merci à vous.

Je remercie aussi, le professeur **Khalid MINAOUI**, professeur habilité à la faculté des sciences de Rabat, pour avoir accepté de rapporter cette thèse de doctorat. Je le remercie aussi pour ces remarques très constructives qui m'ont amené à améliorer mon travail.

Je remercie également, le professeur **Youssef FAKHRI**, professeur habilité à la faculté des sciences de Kénitra, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail en acceptant de rapporter ma thèse. Je le remercie aussi pour ces nombreux conseils et suggestions.

Je remercie aussi infiniment le professeur **Dounia LOTFI**, professeur habilité à la faculté des sciences de Rabat pour avoir acceptée de participer à ma soutenance de thèse entant qu'examinatrice. Je la remercie aussi pour ces nombreux conseils.



RÉSUMÉ

Les dernières avancées technologiques dans le domaine de la microélectronique et de la communication sans fil ont permis le développement de nouveaux capteurs efficaces et moins coûteux. Ces dispositifs sont capables de collecter et de communiquer des données via un support sans fil de façon autonome, ce qui forme les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF). Ce type de réseaux a conquis une diversité de champs d'applications (services de santé, domotique, domaine militaire, surveillance de l'environnement, etc.). Cependant, il souffre de beaucoup de limitations. Le problème le plus critique rencontré dans ces réseaux est la limitation des ressources d'alimentation, qui affecte directement la qualité de service (Quality of Service (QoS)) du réseau et la durée de vie des nœuds capteurs. Par conséquent, la couche (Medium Access Control (MAC)) est considérée comme la première responsable à traiter ce problème, car l'émetteur-récepteur est la principale source de gaspillage d'énergie.

Dans cette thèse, nous nous concentrons sur trois types de RCSF : événementiels, périodiques et hétérogènes. Un RCSF événementiel est caractérisé par un trafic en rafale, comme dans les applications militaires où les capteurs doivent signaler tout mouvement dans le champ surveillé. Ce type d'application ne tolère pas la latence, car elle peut causer de gros dégâts. Alors qu'un RCSF périodique est caractérisé par un trafic périodique, comme dans les applications environnementales où les nœuds capteurs sont sensés transmettre périodiquement des données (température, humidité, etc.) à la station de base.

Pour répondre aux différentes exigences de ce type de réseaux, et surtout celles liées à la conservation d'énergie, nous avons conçu dans la première partie de cette thèse deux nouveaux protocoles MAC, appelés (Kalman Filter MAC (KF-MAC)) et (an Adaptive Duty-cycle MAC (AD-MAC)), capables d'adapter le cycle de sommeil/réveil des nœuds capteurs à la charge de trafic réseau. Ces protocoles utilisent des mécanismes de prédiction pour estimer le moment où les nœuds capteurs se réveillent ou se mettent en veille en fonction des statistiques précédentes du trafic dans le réseau.

Dans la deuxième partie, nous abordons les réseaux hétérogènes, qui constituent une bonne solution pour atteindre plusieurs objectifs en utilisant la même infrastructure. En effet, cette dernière permet la coexistence de différents types de nœuds dans le même réseau, ce qui met en évidence la nécessité de traiter différemment chacun de ces types en fonction de ses caractéristiques. Cependant, les réseaux hétérogènes ont besoin d'une nouvelle génération de protocoles de communication capables de gérer l'hétérogénéité du trafic et les capacités des nœuds. À cet égard, nous avons conçu un nouvel algorithme appelé (Energy based Collision Avoidance MAC (ECA-MAC)) destiné à résoudre certains de ces problèmes. ECA-MAC donne la possibilité d'accéder au support de transmission en se basant sur le niveau énergétique des nœuds émetteurs.

Mots-clés : Couche MAC, RCSF, application événementielle, filtre d'estimation, filtre de Kalman, qualité de service (QoS), faible consommation d'énergie, protocoles basés sur la contention.



ABSTRACT

The latest technological advances in microelectronics and wireless communication fields have led to the development of new efficient and less expensive sensors. These devices are capable of collecting and transmitting data via wireless support autonomously, forming the (Wireless Sensor Network (WSN)). This type of network has conquered a variety of application fields (health services, home automation, military field, environmental monitoring, etc.). However, WSN suffers from many limitations. The most critical problem encountered in these networks is the limitation of power resources, which directly affects the (QoS) of the network and the sensor nodes lifespan. Therefore, the (MAC) layer is considered the first to deal with this problem because the transceiver is the main source of energy dissipation.

In this thesis, we focus on three types of WSN : event-driven, periodic and heterogeneous. An event-driven WSN is characterized by burst traffic, as in military applications where sensors must report any movement in the monitored field. This type of application does not tolerate latency because it can cause big damage. While a periodic WSN is characterized by periodic traffic, as in environmental applications where the sensor nodes must periodically transmit data (temperature, humidity, etc.) to the sink node.

To meet the different requirements of this type of application, especially the one related to energy conservation, we have designed in the first part of this thesis two new MAC protocols, called (KF-MAC) and (AD-MAC), able to adapt the sleep/wake cycle of sensor nodes to network traffic loads. These protocols use prediction mechanisms to estimate when the sensor nodes wake up or sleep based on previous traffic load statistics.

In the second part, we discuss heterogeneous networks, which are a good solution to achieve several objectives using the same infrastructure. Indeed, the latter causes the coexistence of different nodes in the same network, which highlights the need to process differently each type of nodes according to its characteristics. However, they need a new generation of communication protocols that can handle heterogeneous traffic and node capabilities. In this regard, we have designed a new algorithm called (ECA-MAC) to resolve some of these problems. ECA-MAC gives the possibility to access the transmission medium based on the energy level of the transmitter node.

Keywords : MAC layer, WSN, event-driven application, Kalman filter, quality of service (QoS), low power consumption, energy evaluation, contention-based protocols.



TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-------------|
| Résumé | iii |
| Abstract | v |
| Résumé détaillé | vii |
| Liste des notations et abréviations | xiii |
| Liste des figures | xix |
| Liste des tableaux | xx |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 1 |
| Contexte | 1 |
| Contributions | 2 |
| Organisation de la thèse | 3 |
| Chapitre 1 : RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL | 5 |
| 1.1 Introduction | 5 |
| 1.2 Domaines d'application | 8 |
| 1.3 Contraintes et Caractéristiques de RCSF | 9 |
| 1.4 Modes d'opération d'un RCSF | 10 |
| 1.4.1 Architectures de RCSF | 10 |
| 1.4.2 Topologies | 11 |
| 1.4.3 Déploiement des nœuds | 12 |
| 1.4.4 Modèles de communication et de transmission de données | 12 |
| 1.4.5 Durée de vie d'un RCSF | 13 |
| 1.5 Sources de consommation d'énergie et de dissipation | 14 |
| 1.5.1 Sources de consommation d'énergie | 14 |
| 1.5.2 Sources de la dissipation d'énergie dans la couche MAC | 15 |
| 1.6 Quelques approches d'économie d'énergie proposées dans la littérature | 15 |
| 1.7 Protocoles MAC pour RCSF | 16 |
| 1.7.1 Protocoles MAC basés sur la contention | 17 |
| 1.7.2 Protocoles MAC basés sur l'échantillonnage de préambule et l'écoute de faible puissance (Low-Power Listening (LPL)) | 17 |
| 1.7.3 Protocoles MAC basés sur la planification | 18 |
| 1.7.4 Protocoles MAC hybrides | 18 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 1.8 | Conclusions | 19 |
| Chapitre 2 : PROTOCOLES MAC DÉTERMINISTES DÉDIÉS AUX RCSF | | 21 |
| 2.1 | Protocole TRAMA | 21 |
| 2.2 | Protocole FLAMA | 22 |
| 2.3 | Protocole LMAC | 23 |
| 2.4 | Protocole AI-LMAC | 24 |
| 2.5 | Protocole MC-LMAC | 25 |
| 2.6 | Protocole SMACS | 26 |
| 2.7 | Protocole EMACS | 26 |
| 2.8 | Protocole DMAC | 27 |
| 2.9 | protocole DE-MAC | 28 |
| 2.10 | Standard IEEE 802.15.4/Zigbee | 29 |
| 2.10.1 | IEEE 802.15.4 WPAN | 30 |
| 2.10.1.1 | Composants de WPAN | 30 |
| 2.10.1.2 | Topologies de réseau | 30 |
| 2.10.2 | Architecture des périphériques LR-WPAN | 31 |
| 2.10.3 | La couche physique du standard IEEE 802.15.4 | 32 |
| 2.10.3.1 | Détection d'énergie du récepteur (ED) | 33 |
| 2.10.3.2 | Indication de la qualité de la liaison (LQI) | 33 |
| 2.10.3.3 | L'évaluation du canal libre (CCA) | 34 |
| 2.10.3.4 | Paquet PPDU | 34 |
| 2.10.4 | La couche MAC du standard IEEE 802.15.4 | 34 |
| 2.10.4.1 | Structure de la super-trame | 35 |
| 2.10.4.2 | Algorithme CSMA/CA | 36 |
| 2.10.4.3 | Modèles de transfert de données | 38 |
| 2.10.5 | Limitations identifiées dans IEEE 802.15.4 | 41 |
| 2.11 | Conclusion | 42 |
| Chapitre 3 : L'OPTIMISATION DE L'ÉNERGIE BASÉE SUR DES MÉCANISMES DE PRÉDICTION DE TRAFICS | | 43 |
| 3.1 | Introduction | 43 |
| 3.2 | Environnement de simulation | 44 |
| 3.2.1 | Mesures de performance | 44 |
| 3.2.2 | Simulateur NS-2 | 45 |
| 3.3 | Filtre de Kalman pour l'optimisation de l'énergie dans les RCSF | 45 |
| 3.3.1 | Travaux connexes | 45 |
| 3.3.2 | Modélisation de réseau et principes de conception du protocole KF-MAC | 47 |
| 3.3.3 | Processus de fonctionnement du protocole KF-MAC | 50 |
| 3.3.4 | Paramètres de simulation | 51 |
| 3.3.5 | Résultats de la simulation | 52 |
| 3.3.5.1 | Résultats en utilisant un trafic périodique | 52 |
| 3.3.5.2 | Résultats en utilisant un trafic exponentiel | 54 |
| 3.4 | Cycle de fonctionnement adapté pour l'optimisation de l'énergie dans les RCSF | 56 |
| 3.4.1 | Travaux connexes | 56 |
| 3.4.2 | Le mode de fonctionnement du protocole AD-MAC | 57 |
| 3.4.3 | Simulation du protocole AD-MAC | 60 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 3.4.3.1 | Résultats de la simulation sous un trafic exponentiel | 60 |
| 3.4.3.2 | Résultats de simulation sous un trafic périodique | 62 |
| 3.5 | Conclusion | 63 |
| Chapitre 4 : DIFFÉRENCIATION DES RESSOURCES POUR LES RÉSEAUX HÉTÉROGÈNES | | 65 |
| 4.1 | Introduction | 65 |
| 4.2 | S-MAC | 66 |
| 4.3 | Évitement des collisions basé sur l'énergie au niveau de la couche MAC pour les RCSF | 67 |
| 4.3.1 | Travaux connexes | 67 |
| 4.3.2 | Algorithme ECA-MAC | 68 |
| 4.3.3 | RÉSULTATS DE LA SIMULATION | 69 |
| 4.3.3.1 | L'évaluation de la latence | 71 |
| 4.3.3.2 | L'évaluation de l'énergie | 72 |
| 4.3.3.3 | L'évaluation de PDR | 72 |
| 4.4 | Conclusions | 72 |
| Chapitre 5 : Conclusions et Perspectives | | 75 |
| 5.1 | Conclusions | 75 |
| 5.2 | Travaux futurs | 76 |
| Liste des publications | | 77 |
| Bibliographie | | 79 |



LISTE DES NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

| | | |
|-----------------|--|-----|
| ACR | an Adaptive Collision Resolution | 56 |
| AD-MAC | an Adaptive Duty-cycle MAC | iii |
| Adv-MMAC | Advertisement Based Multi-channel Distributed MAC | 46 |
| AEA | an Adaptive Election Algorithm | 22 |
| AH-MAC | an Adaptive Hierarchical MAC | 47 |
| AI-LMAC | an Adaptive, Information-centric and Lightweight MAC | 24 |
| BE | Backoff Exponent | 36 |
| BI | Beacon Interval | 35 |
| BO | Beacon Order | 35 |
| CAN | Convertisseur Analogique Numérique | 7 |
| CAP | Contention Access Period | 35 |
| CBR | Constant Bit Rate | 51 |
| CCA | Clear Channel Assessment | 30 |
| CDMA | Code Division Multiple Access | 18 |
| CFP | Contention Free Period | 35 |
| CH | Cluster Head | 10 |
| CID | Cluster Identifier | 31 |
| CR | Communication Request | 27 |
| CSMA/CA | Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance | 16 |
| CW | Contention Window | 36 |
| DDT | Data Distribution Table | 24 |
| DE-MAC | Distributed Energy aware MAC | 28 |
| DFI | Data Forwarding Interruption | 27 |
| DMAC | Dynamic MAC | 27 |
| DSSS | Direct Sequence Spread Spectrum | 32 |
| DURI-MAC | Dual Channel Receiver Initiated MAC | 47 |
| ECA-MAC | Energy based Collision Avoidance MAC | iii |
| ED | Energy Detection | 30 |
| EDS-MAC | Energy Efficient Dynamic Scheduling MAC | 46 |
| EMAC | EYES MAC | 26 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| FDMA | Frequency Division Multiple Access | 18 |
| FFD | Full Function Device | 30 |
| FLAMA | FLow-Aware Medium Access | 22 |
| GAF | Geographic Adaptive Fidelity | 16 |
| GTS | Guaranteed Time Slot | 34 |
| HA | Hello Acquittment | 46 |
| IFS | Inter Frame Spacing | 36 |
| KF-MAC | Kalman Filter MAC | iii |
| LEACH | Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy | 47 |
| LLC | Logical Layer Control | 31 |
| LIFS | Long Inter Frame Space | 36 |
| LMAC | Lightweight Medium Access Control | 23 |
| LPL | Low-Power Listening | ix |
| LQI | Link Quality Indication | 30 |
| LR-WPAN | Low Rate WPAN | 31 |
| MAC | Medium Access Control | iii |
| MC-MAC | Mission-Critical MAC | 46 |
| MCMAC | Multi-Channel MAC | 25 |
| ML-MAC | Multi-Layer MAC | 46 |
| MLME | MAC Sub-layer Management Entity | 34 |
| MPDU | MAC Protocol Data Unit | 34 |
| MTS | More to Send | 28 |
| NAV | Network Allocation Vector | 66 |
| NB | Number of Backoffs | 36 |
| NOAH | NO Ad-Hoc Routing Agent | 70 |
| NP | Neighbor Protocol | 22 |
| NS-2 | Network Simulator 2 | 45 |
| OSI | Open Systems Interconnection | 31 |
| OTCL | Object Tool Command Language | 45 |
| PAN | Personal Area Network | 30 |
| PBA-MAC | Prediction-Based Asynchronous MAC | 45 |
| PDI | Postponed Data Information | 49 |
| PDR | Packet Delivery Ratio | 44 |
| PLME | Physical Layer Management Entity | 32 |
| PPDU | Physical Protocol Data Unit | 32 |
| PRIN | PRiority in Node | 46 |
| PR-MAC | a Priority Reservation MAC | 67 |
| PSDU | Physical Layer Service Data Unit | 33 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| PW-MAC | Predictive-Wakeup | 46 |
| QoS | Quality of Service | iii |
| RAM | Random Access Memory | 6 |
| RCSF | Réseaux de Capteurs Sans Fil | iii |
| RF | Radio Frequency | 31 |
| RFD | Reduced Function Device | 30 |
| RI-MAC | Receiver-Initiated Asynchronous Duty Cycle MAC | 47 |
| RITMC | Receiver-Initiated Multi-Channel MAC | 46 |
| RL-MAC | Reinforcement Learning based MAC | 68 |
| ROM | Read Only Memory | 6 |
| RTS/CTS | Request to Send/Clear to Send | 16 |
| SAP | Service Access Point | 34 |
| SCP-MAC | Scheduled Channel Polling MAC | 19 |
| SD | Super-frame Duration | 35 |
| SEP | Schedule Exchange Protocol | 22 |
| S-MAC | Sensor MAC | 44 |
| SIFS | Short Inter Frame Space | 36 |
| SMACS | Self-organizing Medium Access Control for Sensor Network | 26 |
| SO | Super-frame Order | 35 |
| SPIN | Sensor Protocols for Information via Negotiation | 16 |
| SRI-MAC | Synchronous Receiver Initiated | 45 |
| SSCS | Service Specific Convergence Sub-layer | 31 |
| SYNC | Synchronization packet | 66 |
| TC | Traffic Control | 27 |
| TCL | Tool Command Language | 45 |
| TDMA | Time Division Multiple Access | 15 |
| TRAMA | TRaffic-Adaptive Medium Access control | 21 |
| TSP | Time Slot Period | 69 |
| VSSFFA | Variable Step Size Firefly Algorithm | 46 |
| WA-MAC | Weather Adaptive MAC | 46 |
| WPAN | Wireless Personal Area Network | 36 |
| WSN | Wireless Sensor Network | v |
| Z-MAC | Zebra MAC | 19 |



LISTE DES FIGURES

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | UN EXEMPLE D'UN RÉSEAU DE CAPTEURS SANS FIL | 6 |
| 1.2 | ARCHITECTURE INTERNE D'UN NŒUD CAPTEUR | 7 |
| 1.3 | ARCHITECTURE D'UN RCSF | 10 |
| 1.4 | LES TYPES DE TOPOLOGIES DES RCSF | 11 |
| 1.5 | TYPES DE PROTOCOLES MAC DÉDIÉS AUX RCSF | 17 |
| 2.1 | FORMAT D'UNE TRAME TRAMA | 22 |
| 2.2 | DÉCOUPAGE TEMPOREL DE FLAMA | 23 |
| 2.3 | FORMAT DE LA TABLE DE DISTRIBUTION DES DONNÉES | 24 |
| 2.4 | MÉCANISMES DE COORDINATION ET DE STRUCTURATION DE MC-LMAC | 25 |
| 2.5 | FORMAT D'UNE TRAME EMACS | 27 |
| 2.6 | ARBRE DE COLLECTE DE DONNÉES DMAC | 28 |
| 2.7 | MODÈLES DE TOPOLOGIE | 30 |
| 2.8 | ARCHITECTURE D'UN PÉRIPHÉRIQUE IEEE 802.15.4 | 32 |
| 2.9 | BANDES DE FRÉQUENCES UTILISÉES PAR LA NORME IEEE 802.15.4 | 33 |
| 2.10 | STRUCTURE DE LA SUPER-TRAME IEEE 802.15.4 | 36 |
| 2.11 | ALGORITHME CSMA/CA | 38 |
| 2.12 | PROCESSUS DE COMMUNICATION AVEC UN COORDINATEUR DANS LE MODE BEACON-ENABLED | 39 |
| 2.13 | PROCESSUS DE COMMUNICATION AVEC UN COORDINATEUR DANS LE MODE NON BEACON-ENABLED | 39 |
| 2.14 | PROCESSUS DE COMMUNICATION D'UN COORDINATEUR DANS LE MODE BEACON-ENABLED | 40 |
| 2.15 | PROCESSUS DE COMMUNICATION D'UN COORDINATEUR DANS LE MODE NON BEACON-ENABLED | 40 |
| 3.1 | TOPOLOGIE DE L'EXEMPLE PROPOSÉ | 48 |
| 3.2 | CONFIGURATION DE LA SUPER-TRAME DE NŒUD N_2 | 48 |
| 3.3 | SUPER-TRAME DE NŒUD N_2 | 49 |
| 3.4 | RÉSULTATS DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE | 52 |
| 3.5 | RÉSULTATS DE LA LATENCE MOYENNE | 53 |
| 3.6 | RÉSULTATS DU TAUX DE PAQUETS DÉLIVRÉS | 54 |
| 3.7 | RÉSULTATS DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE | 54 |
| 3.8 | RÉSULTATS DE LA LATENCE MOYENNE | 55 |
| 3.9 | RÉSULTATS DU TAUX DE PAQUETS DÉLIVRÉS | 55 |
| 3.10 | CONFIGURATION DE LA SUPER-TRAME AD-MAC | 58 |
| 3.11 | RÉSULTATS DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE | 60 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.12 | RÉSULTATS DE LA LATENCE | 61 |
| 3.13 | RÉSULTATS DE PDR | 61 |
| 3.14 | RÉSULTATS DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE | 62 |
| 3.15 | RÉSULTATS DE LA LATENCE | 63 |
| 3.16 | RÉSULTATS DE PDR | 63 |
| 4.1 | FORMAT DE LA TRAME SMAC | 66 |
| 4.2 | MÉCANISME DE LA FENÊTRE DE CONTENTION DE L'ALGORITHME ECA-MAC . | 69 |
| 4.3 | DIAGRAMME DE L'ALGORITHME ECA-MAC | 70 |
| 4.4 | RÉSULTATS DE LE LATENCE | 71 |
| 4.5 | RÉSULTATS DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE | 72 |
| 4.6 | RÉSULTATS DE PDR | 73 |



LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | BANDES DE FRÉQUENCES UTILISÉES PAR LA NORME IEEE 802.15.4 | 33 |
| 2.2 | STRUCTURE DU PAQUET PPDU | 34 |
| 3.1 | FORMAT DU PAQUET PDI | 49 |
| 3.2 | PARAMÈTRES DE SIMULATION | 52 |
| 3.3 | FORMAT DU PAQUET PDF | 60 |
| 4.1 | PARAMÈTRES DE SIMULATION | 71 |



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte

Au cours de ces dernières années, les avancées scientifiques et technologiques ont joué un rôle clé dans la société moderne. Ces avancées ont conduit à de nombreux changements qui ont exponentiellement contribué à faciliter la vie des individus, tels que : la télémédecine, le réseau véhiculaire, les villes intelligentes, l'internet des objets, le système de transport intelligent, la vision par ordinateur, la finance, les médias, la fabrication, l'éducation, etc. L'émergence de ces nouvelles avancées est le fruit d'un développement et d'une amélioration en permanence des technologies de la miniaturisation des systèmes micro-électroniques et de communications.

Parallèlement à ces progrès technologiques, il est parfaitement clair que tous les aspects de la vie moderne - au travail, à l'école, à la maison et dans les loisirs - dépendent de plus en plus de la collect, la manipulation et de la transmission des informations numériques. Cela n'a été possible que grâce à l'intégration et l'utilisation avancées des capteurs et la technologie de communication sans fil [1]. La combinaison de ces deux technologies a mené à la naissance de la technologie des RCSF.

Un réseau de capteurs sans fil est composé d'un grand nombre de nœuds capteurs qui sont connectés entre eux par une liaison sans fil. Dans ce type de réseaux, les nœuds capteurs sont de petits dispositifs adressés principalement pour mesurer des grandeurs physiques ou bien surveiller un événement sur une zone donnée. La nature des informations collectées dépend fortement du type de l'application dans laquelle les nœuds sont utilisés. En outre, ils sont conçus pour effectuer certains traitements et transmettre leurs données à un nœud plus puissant (station de base) via un support sans fil. Généralement, la station de base offre des capacités de stockage et de traitement élevées par rapport à celles des nœuds capteurs.

Cependant, les RCSF ont des contraintes spéciales et différentes de celles des réseaux sans fil traditionnels [2]. Plusieurs problèmes sont apparus et ont rendu les réseaux sans fil moins fiables que les réseaux filaires, notamment ceux liés à l'accès au médium, tels que la faible fiabilité de la communication sans fil, le problème des stations cachées, ainsi que le défi majeur représenté par le manque de ressources énergétiques, vu que les nœuds capteurs sont généralement alimentés par des batteries à durée de vie limitée [3]. Cette contrainte énergétique a un fort impact sur la durée de vie du réseau, elle devient ainsi une préoccupation majeure, en particulier si les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles.

Il existe plusieurs solutions techniques (liées au matériel) qui peuvent prolonger la durée de vie de ces dispositifs et ainsi maximiser la durée de vie du réseau, comme par exemple, l'association des organes de récupération d'énergie (solaire, thermique, mécanique, etc.) aux nœuds capteurs. Cependant, ce sont toujours des solutions coûteuses. En outre, Certaines zones soumises à des contraintes environnementales particulières ne permettent pas à ces organes de fonctionner correctement pour recharger les batteries. Cela a entraîné donc un problème de

préservation d'énergie, particulièrement si l'application est de type temps-réel.

Toutes ces contraintes augmentent la complexité de la conception des protocoles de communication des RCSF. Plusieurs protocoles et techniques ont été proposés pour faire face aux problèmes liés à ce type de réseaux, en commençant par les méthodes de modulation dans la couche physique, en passant par les méthodes de compression de données, jusqu'aux algorithmes intelligents dans la couche application [4].

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la résolution des problèmes complexes liés à la couche (MAC) des RCSF. Cette couche est considérée comme l'une des couches clés pouvant améliorer les performances du réseau. La couche MAC a principalement deux fonctions : d'une part, elle est responsable de la gestion des états de l'interface radio, à savoir les états d'émission, de réception, de veille et de sommeil. D'autre part, elle contrôle l'accès au médium, de manière à garantir aux nœuds la fiabilité de l'accès au support partagé. Grâce à nos contributions, nous avons l'intention de traiter les deux fonctionnalités de la couche MAC.

Nous nous concentrons sur deux environnements spécifiques du RCSF. Dans la première et deuxième contributions, nous visons à améliorer les performances des applications caractérisées par un trafic événementiel et périodique en mettant en œuvre deux nouveaux protocoles éco-énergétiques capables d'adapter les états de l'interface radio à ce type d'applications. Tandis que, dans la troisième contribution, nous avons conçu une nouvelle technique d'accès au support de transmission qui assure la qualité de service pour les réseaux de capteurs sans fil hétérogènes. Dans la section suivante, nous donnerons plus de détails sur les motivations de chaque contribution.

Contributions

D'après l'architecture interne des nœuds capteurs, le gaspillage d'énergie provient de nombreuses sources (unité de la communication, unité du traitement et unité de détection). Généralement, L'interface radio est le composant le plus consommateur d'énergie. Compte tenu des caractéristiques de RCSF, l'utilisation d'une couche MAC efficace en termes de la consommation d'énergie peut prolonger la durée de vie de réseau. La plupart des couches MAC dédiées au RCSF utilisent les techniques de duty-cycle. Ces techniques ont de nombreux inconvénients tels que la latence élevée, débit faible, etc. Cependant, la latence peut jouer un rôle primordial dans certaines applications où des phénomènes pourraient se produire soudainement. Le réseau doit donc relayer l'événement capturé au récepteur le plus rapidement possible, afin de prendre les décisions appropriées concernant cet événement. (En règle générale, ces réseaux sont caractérisés par des charges de trafic en rafale. Pendant un certain temps, un seul événement peut se produire, mais une fois détecté, il devrait être signalé à la station de base, ce qui met en évidence la contrainte de temps critique dans ce type de réseaux.)

L'économie de la consommation d'énergie est considérée comme étant le problème le plus délicat des RCSF. Dans la première et la deuxième contribution, nous visons à résoudre ce problème en proposant des solutions permettant de maximiser l'efficacité de la consommation d'énergie. Par conséquent, la durée de vie des nœuds capteurs sera prolongée le plus possible grâce à des mécanismes de prédiction. L'objectif principal de ces mécanismes est d'optimiser la durée de l'intervalle de sommeil des nœuds capteurs entre deux réveils consécutifs. En générale, Le nœud capteur ne doit être réveillé que s'il doit recevoir ou transmettre des données sans entraîner des coûts d'écoute inutiles.

Dans la première contribution, « *A Kalman Filter Process for Energy Optimization in WSNs* », nous traitons deux défis : D'une part, la contrainte liée aux charges de trafic

événementiel sur le réseau, d'autre part, nous nous intéressons à la contrainte de la consommation d'énergie. Alors, pour résoudre ces problèmes, nous proposons d'adapter les états de l'interface radio au trafic de réseau. Au niveau de la couche MAC, le manque de ressources énergétiques a été résolu en mettant l'interface radio en mode sommeil le maximum possible ce qui réduit le temps d'écoute, et par conséquent, minimise la consommation énergétique. Dans notre protocole, ces périodes de sommeil sont contrôlées par l'estimateur de Kalman.

Dans la deuxième contribution, « *Adaptive Duty-Cycle Scheme Based on a New Prediction Mechanism for Energy Optimization over IEEE 802.15.4 Wireless Network* », nous visons à créer un nouveau protocole de communication basé sur la norme IEEE 802.15.4 qui permet de réduire la dissipation d'énergie lorsque l'émetteur-récepteur attend des paquets potentiels. Nous utilisons un nouveau mécanisme de prédiction, ce mécanisme estime le moment où les nœuds capteurs se réveillent ou se mettent en sommeil en se basant sur des statistiques de charge de trafic précédentes. En d'autres termes, il y aura une adaptation entre l'activation de l'interface radio et les flux de trafic des nœuds.

Dans la troisième contribution, nous visons à améliorer les performances du réseau en termes de latence, de taux de paquets délivrés, et de la consommation d'énergie. Généralement, dans les réseaux de capteurs sans fil, tous les nœuds capteurs utilisés sont impliqués dans un seul objectif global. Toutefois, dans de nombreux cas, il sera préférable d'utiliser le même réseau de capteurs sans fil pour de nombreux objectifs afin de minimiser les coûts de déploiement. Dans ce type de réseaux, nous sommes en mesure de détecter et surveiller plusieurs phénomènes en utilisant la même infrastructure. Par exemple, dans le domaine industriel, ces réseaux pourraient être utilisés pour signaler régulièrement la température de locaux, parallèlement, avertir en cas d'incendie. Cependant, Ce type de réseaux donne lieu à des nouveaux défis pour les protocoles de communication. Pour pallier à ce genre de problèmes, nous devons différencier les services ou les ressources du trafic hétérogène coexistant dans le même réseau. D'après la contribution, « *Energy based Collision Avoidance at the MAC layer for Wireless Sensor Network* », nous visons à créer un nouvel algorithme au niveau de la couche MAC capable de traiter la transmission de données en fonction du niveau énergétique de la batterie des nœuds. Dans ce type de réseaux, nous définissons trois niveaux de priorité pour différencier les nœuds du réseau. La couche MAC devrait donner aux nœuds ayant une faible énergie une priorité élevée afin de transmettre leurs données avant les autres et sans collision. Notre objectif est de résoudre ce problème en utilisant des fenêtres de contention disjointes qui dépendent de la priorité de chaque nœud.

Organisation de la thèse

Le reste de ce mémoire de thèse est structuré comme suit :

Chapitre 2 - Réseaux de capteurs sans fil. Ce chapitre présente les concepts de base qui permettent d'appréhender le reste de cette thèse. Au début, nous décrivons de manière générale les réseaux de capteurs sans fil, leurs applications et leurs principaux défis. Ensuite, nous définissons les faiblesses de ces réseaux, ainsi nous citons brièvement les solutions qui ont été mises en œuvre pour améliorer les performances des RCSF.

Chapitre 3 - Les protocoles MAC déterministes dédiés aux RCSF. Dans ce chapitre, nous donnons une étude détaillée des solutions les plus courantes dans la littérature. Au début, nous présentons un bref aperçu du fonctionnement de la couche MAC, puis nous résumons les idées les plus importantes des protocoles MAC déterministes conçus pour améliorer les applications de RCSF.

Chapitre 4 - *L'optimisation de l'énergie basée sur des mécanismes de prédiction de trafics*. Ce chapitre est subdivisé en deux parties principales : dans la première partie, nous présentons la première contribution de cette thèse. Ensuite, nous abordons la deuxième contribution qui vise à améliorer les performances des RCSF. Pour chaque partie, nous développons en détails nos motivations. Puis, nous décrivons le principe de fonctionnement des protocoles proposés qui s'adaptent aux applications caractérisées par un trafic événementiel. Pour améliorer l'efficacité de nos protocoles, nous montrons les résultats obtenus lors de la simulation réalisée. Les conclusions générales sur les deux contributions sont analysées à la fin de ce chapitre.

Chapitre 5 - *Différenciation des ressources pour les réseaux hétérogènes*. Dans ce chapitre nous traitons en détaille la troisième contribution de ce mémoire de thèse, et nous montrons les résultats numériques détaillés qui prouvent l'efficacité de notre contribution. A la fin de ce chapitre nous analysons les conclusions générales de cette contribution.

Chapitre 6 - *Conclusions et perspectives*. Ce chapitre résume les principales conclusions tirées de cette thèse et donne des perspectives pour les travaux futurs.

RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

Sommaire

| | | |
|-------|---|----|
| 1.1 | Introduction | 5 |
| 1.2 | Domaines d'application | 8 |
| 1.3 | Contraintes et Caractéristiques de RCSF | 9 |
| 1.4 | Modes d'opération d'un RCSF | 10 |
| 1.4.1 | Architectures de RCSF | 10 |
| 1.4.2 | Topologies | 11 |
| 1.4.3 | Déploiement des nœuds | 12 |
| 1.4.4 | Modèles de communication et de transmission de données | 12 |
| 1.4.5 | Durée de vie d'un RCSF | 13 |
| 1.5 | Sources de consommation d'énergie et de dissipation | 14 |
| 1.5.1 | Sources de consommation d'énergie | 14 |
| 1.5.2 | Sources de la dissipation d'énergie dans la couche MAC | 15 |
| 1.6 | Quelques approches d'économie d'énergie proposées dans la littérature | 15 |
| 1.7 | Protocoles MAC pour RCSF | 16 |
| 1.7.1 | Protocoles MAC basés sur la contention | 17 |
| 1.7.2 | Protocoles MAC basés sur l'échantillonnage de préambule et l'écoute de faible puissance (LPL) | 17 |
| 1.7.3 | Protocoles MAC basés sur la planification | 18 |
| 1.7.4 | Protocoles MAC hybrides | 18 |
| 1.8 | Conclusions | 19 |

1.1 Introduction

Depuis plusieurs années, la nécessité de contrôler, de surveiller et d'observer des phénomènes physiques tels que la pression, la température, l'humidité, etc., est devenue l'objectif principal de nombreuses applications scientifiques et industrielles.

Aujourd'hui, les progrès des technologies sans fil et de miniaturisation des circuits électroniques ont donné naissance à une nouvelle catégorie de réseaux appelée RCSF. Ce type de réseaux se caractérise par le déploiement d'un grand nombre de petits dispositifs autonomes capables de collecter des mesures environnementales et physiques (voir figure 1.1). Ces dispositifs sont appelés des nœuds capteurs. Chaque nœud capteur comprend un capteur ou un actionneur et une carte réseau sans fil. Le capteur/actionneur est dédié à une tâche spécifique en fonction du type d'application (comme relever la température, détecter la présence ou commander une

électrovanne, etc.). L'information collectée et semi-traitée par le capteur est ensuite passée à la carte réseau du nœud qui la communique généralement via le réseau à un nœud plus puissant appelé station de base. Généralement, la station de base offre des capacités de stockage et de traitement élevées par rapport aux autres nœuds de réseau.

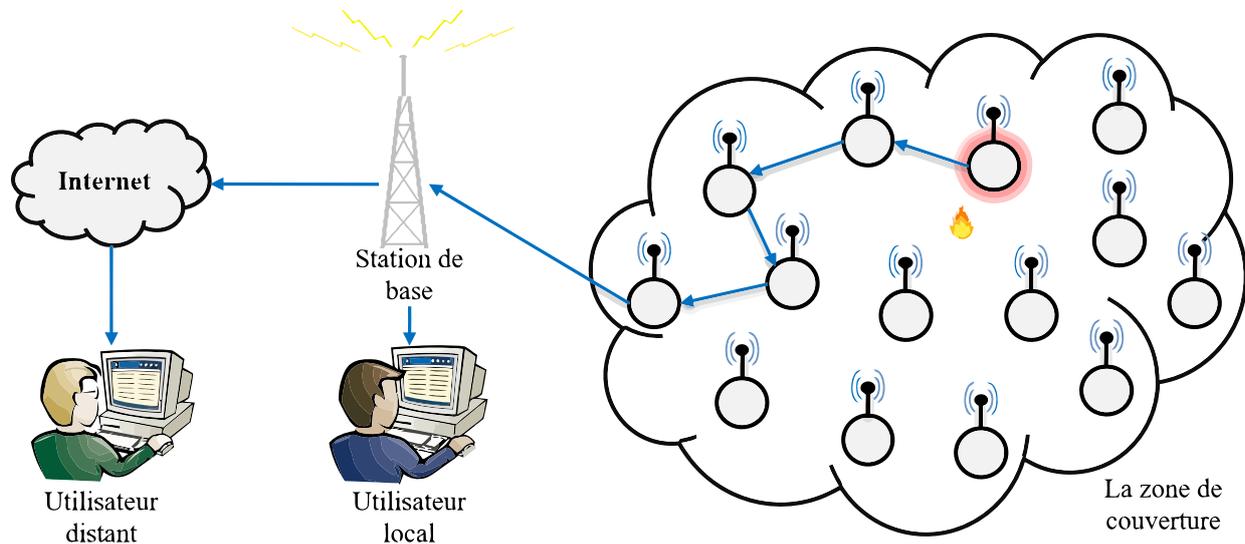


Figure 1.1 – UN EXEMPLE D'UN RÉSEAU DE CAPTEURS SANS FIL

Les nœuds capteurs sont caractérisés par leurs capacités de s'auto-organiser (sans topologie préalable ; chaque nœud du réseau est capable de détecter ses voisins et de relayer des données, soit directement, soit par le biais de nœuds), et de tolérer les pannes (si un nœud tombe en panne, les autres nœuds continuent à effectuer leurs tâches sans affecter le fonctionnement du réseau). Ces caractéristiques leur permettent de fonctionner de manière autonome sans qu'il y ait une intervention humaine pendant de longues périodes. Cependant, ces nœuds sont limités en termes de capacité de calcul et de stockage, et ils sont alimentés souvent par une batterie irremplaçable, ce qui influence la durée de vie de ces capteurs, et par conséquent la durée de vie du réseau entier.

Il existe plusieurs capteurs sur le marché dont les caractéristiques changent selon le type d'application (par exemple, les capteurs de température, d'humidité, de pression, de présence, etc.) [5] [6]. Même avec cette différence dans leurs caractéristiques, leurs architectures matérielles restent similaires. Généralement un capteur est composé de cinq unités primitives (voir figure 1.2) : de traitement, de stockage, de communication, de détection et d'énergie. D'autres unités optionnelles peuvent être ajoutées selon le domaine d'application [1], comme l'unité de géolocalisation, unité de récupération d'énergie ou un mécanisme de mouvement permettant au nœud de se déplacer.

Unité de traitement : cette unité est composée d'un microprocesseur ou d'un microcontrôleur. Ce dernier est généralement caractérisé par la facilité de programmation et la faible consommation d'énergie [7] [8]. Il coordonne la communication entre les différentes unités, traite des données et contrôle le fonctionnement des autres composants du nœud capteur.

Unité de stockage (Mémoires) : elle inclut une mémoire (Read Only Memory (ROM)) de programme et une mémoire (Random Access Memory (RAM)) de données. La taille de ces mémoires est souvent limitée (environ 10 Ko) essentiellement par les considérations économiques [9]. La quantité de données traitées par cette unité dépend de la taille des données capturées par le nœud lui-même et celles reçues de ses voisins. Récemment, de nouveaux algorithmes

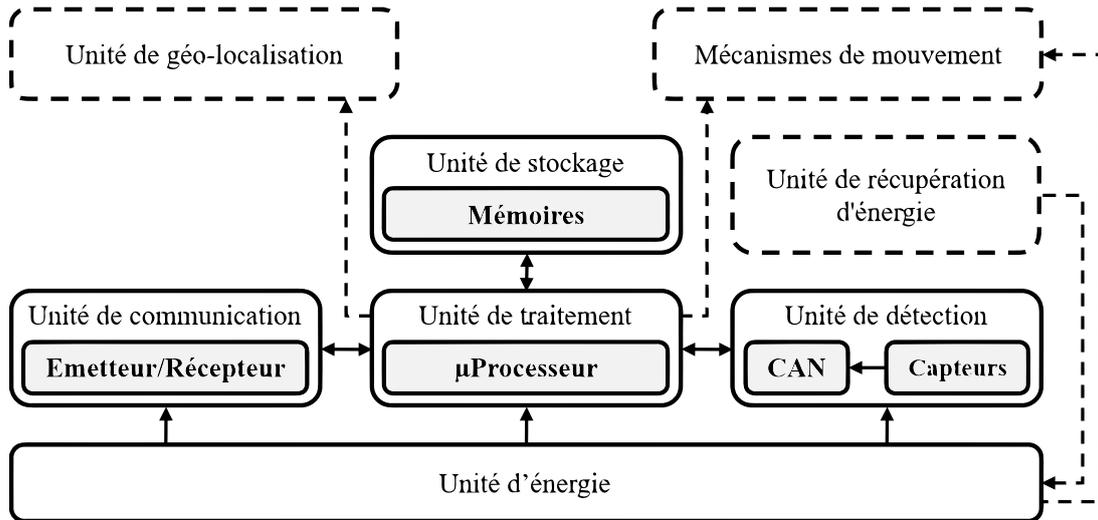


Figure 1.2 – ARCHITECTURE INTERNE D'UN NŒUD CAPTEUR

d'agrégation ont été développés pour réduire le volume des données transmises par le nœud capteur. De plus, des techniques d'équilibrage de charge ont également été conçues pour un traitement distribué de données.

Unité de communication : cette unité est essentiellement composée d'un émetteur-récepteur radio chargé de la transmission et de la réception des données sur un support de communication sans fil. Cette unité fournit quatre modes de fonctionnement : transmission « Tx », réception « Rx », veille « Idle » et endormi « Sleep ». Cette unité représente la partie matérielle la plus consommatrice d'énergie, le fait de mettre l'émetteur-récepteur en mode veille permet de réduire la consommation d'énergie. En outre, l'énergie requise pour transmettre les données dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que du nombre de nœuds intermédiaires qui relayent le message. La portée de la transmission, le débit maximal et la consommation d'énergie sont tous basés sur la technologie sans fil utilisée dans le réseau. Ainsi, le choix de la technologie est lié au type d'application [10].

Unité de détection : cette unité peut contenir un ou plusieurs modules de détection. La fonction principale de ce composant est de capturer ou mesurer des grandeurs physiques (signaux analogiques) puis les convertir en valeurs numériques (Convertisseur Analogique Numérique (CAN)) [11]. Les mesures collectées par cette unité seront ensuite traitées par l'unité de traitement. Il existe différents types de capteurs tels que la température, l'humidité, les capteurs de pression, etc.

Unité d'énergie : cette unité est principalement chargée d'alimenter tous les autres composants. En règle générale, il s'agit d'une batterie irremplaçable de capacité limitée (telle que la batterie Lithiumion [12] ou la batterie AA [13]). Pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des nœuds capteurs. Cependant, la capacité limitée de la batterie reste l'une des contraintes les plus difficiles à surmonter lors de la conception d'un RCSF.

Un nœud de capteur peut éventuellement intégrer une ou plusieurs unités optionnelles telles que :

Unité de géo-localisation : généralement les nœuds sont déployés de manière aléatoire sur le terrain. Dans certains cas, nous sommes sensés connaître la position des capteurs afin de mieux utiliser les informations provenant du réseau. L'unité de géo-localisation fournit au nœud soit une position absolue [14], soit une position relative par rapport à ses voisins.

Unité de récupération d'énergie : le rôle principal de cette unité consiste à augmenter la durée de vie des nœuds. Elle peut utiliser différentes techniques pour recharger la batterie en récupérant des sources d'énergie environnementales : récupérer l'énergie dérivée de sources ambiantes telles que les vibrations, les ondes électromagnétiques et l'énergie solaire [15]. Ensuite, il convertit ces énergies environnementales en énergies électriques. Les auteurs de [16] ont prouvé que la durée de vie des capteurs équipés par cette unité est beaucoup plus longue que celle des nœuds simples. Bien que cette unité soit utilisée pour surmonter le problème de capacité limitée de la batterie, elle reste une solution couteuse et n'est pas faisable pour certaines applications [17].

1.2 Domaines d'application

Comme beaucoup de développement technologique, les RCSF ont été initialement développés pour des intérêts militaires [1], plus précisément, dans le cadre de la surveillance, mais leurs caractéristiques en font des solutions pratiques et incontournables dans plusieurs domaines de notre vie courante. Le domaine d'application des RCSF est très varié dû principalement à sa simplicité de déploiement et au faible coût de la fabrication des nœuds capteurs. Ce type de réseaux peut être utilisé dans plusieurs types d'applications à savoir : militaire [18], environnemental [19], médicale [20], domotique [21], industriel [22], etc. En même temps, les RCSF peuvent également être déployés dans des zones inaccessibles où l'intervention humaine est très risquée ou parfois impossible, comme des zones touchées par les inondations, un séisme, des champs de bataille ou des régions contaminées.

Ces applications peuvent être classées en fonction de leurs objectifs [23], de la structure du trafic généré ou de la topologie utilisée dans le réseau. Des exemples d'applications potentielles des RCSF sont cités ci-après.

Le domaine médical : des capteurs médicaux sans fil sont disposés sur le corps du patient permettant de surveiller de près son état physiologique. Ces capteurs médicaux surveillent les signes vitaux du corps du patient (température, fréquence cardiaque, tension artérielle, saturation en oxygène, etc.) et transmettent ces données régulièrement à un endroit distant sans intervention humaine [20]. Un médecin peut interpréter ces données pour évaluer l'état du patient.

Le domaine de l'agriculture : les RCSF surveillent les conditions environnementales affectant les cultures en traquant les oiseaux, les insectes et autres animaux. Les RCSF permettraient une amélioration de la production en termes de qualité et de quantité par un suivi continu de l'humidité du sol, la température de l'air, rayonnement solaire, hygrométrie de l'air, l'état des plantes [24], etc.

Le domaine environnemental : les RCSF permettraient une évaluation de la pollution atmosphérique, la détection et la prévention des incendies dans des zones forestières, les chutes rocheuses et les inondations [19], etc. Pour surveiller l'environnement, les connaissances techniques sur les réseaux sans fil et leurs protocoles ne sont pas suffisantes. La connaissance de l'écosystème est une condition nécessaire.

Le domaine industriel : les capteurs ont été largement utilisés dans des applications industrielles, telles que la surveillance de chaînes de montage automatisées. L'intégration de la technologie sans fil aux capteurs offre une maintenance conditionnelle permettant de réduire les temps d'arrêt et d'améliorer la sécurité, tout en optimisant les coûts d'installation et de maintenance. Les RCSF peuvent être utilisés pour surveiller le processus de fabrication ou l'état des équipements de fabrication [22]. Par exemple, les usines chimiques ou les raffineurs de pétrole

peuvent utiliser des capteurs pour surveiller l'état de leurs kilomètres de pipelines. Ces capteurs sont utilisés pour alerter en cas de défaillance.

Le domaine de la surveillance structurelle : les capteurs RCSF peuvent être utilisés pour surveiller les mouvements dans les bâtiments et les infrastructures, tels que les ponts, ponts aériens, digues, tunnels, etc., ce qui permet aux méthodes d'ingénierie de surveiller à distance les infrastructures sans nécessiter de visites coûteuses, tout en bénéficiant de données journalières [25], tandis que traditionnellement, ces données étaient collectées chaque semaine ou tous les mois, lors de visites sur site, impliquant parfois la fermeture de routes ou de voies ferrées.

Le domaine de domotique : dans la mesure où les normes de la construction tendent de plus en plus à imposer une bonne gestion de l'énergie, l'introduction des RCSF dans l'habitat offre des solutions pour la maîtrise de l'énergie, qui permettent également d'assurer un confort amélioré dans la maison [21]. Par exemple, les capteurs sans fil sont utilisés pour lire à distance des compteurs dans une maison, telle que l'eau, le gaz ou l'électricité, puis envoyer les lectures à un centre distant via une communication sans fil.

1.3 Contraintes et Caractéristiques de RCSF

Comme nous l'avons cité précédemment, les RCSF peuvent être utilisés dans différents domaines d'application. Cependant, ce sont des dispositifs qui souffrent principalement de plusieurs limitations inhérentes dues à des considérations économiques. Le coût des nœuds de capteurs sans fil doit être minimisé, car dans de nombreuses applications, le nombre de nœuds déployés peut atteindre des milliers de dispositifs. Dans ce qui suit, nous résumons les caractéristiques et les contraintes liées au RCSF [3] :

Limitation de la durée de vie : généralement, un nœud capteur a des ressources énergétiques limitées. Il est généralement alimenté par une batterie irremplaçable. Sa durée de vie dépend donc de celle de la batterie. De plus, dans certains cas, les RCSF sont déployés dans des zones inaccessibles, ce qui rend le remplacement ou la recharge des batteries impossible. La mauvaise exploitation des ressources en énergie peut entraîner une courte durée de vie [26]. Par conséquent, la gestion de l'énergie dans ce type de réseaux est cruciale. Cette caractéristique constitue la contrainte la plus importante pour les protocoles de communication dédiés pour les RCSF.

Faible capacité de traitement et de stockage : cette limitation est due à deux contraintes ; faible coût et faible consommation d'énergie. Généralement, les applications doivent disperser des milliers de capteurs. Par conséquent, le coût de fabrication de ces composants doit rester raisonnable. Deuxièmement, ces dispositifs doivent respecter la contrainte énergétique limitée, de ce fait, ces composants doivent être fabriqués à base de circuits électroniques à faible consommation d'énergie.

Evolutivité : généralement, un grand nombre de nœuds sont dispersés dans la zone surveillée. Un RCSF peut contenir des milliers de nœuds capteurs [6] due à leurs capacités de collaborer entre eux et à satisfaire aux exigences de l'application.

Tolérance aux pannes : au cours du fonctionnement du réseau, certains capteurs peuvent mal fonctionner en raison d'un manque d'énergie (épuiement de la batterie), d'un défaut matériel, etc. Ces défaillances ne doivent pas affecter et perturber le fonctionnement du réseau. De plus, en cas d'ajout de nouveaux nœuds, ces derniers doivent être facilement intégrés au réseau. Donc, le RCSF devrait avoir la capacité de continuer à fonctionner sans interruption de ses tâches et sans dégradation de ses performances [6].

1.4 Modes d'opération d'un RCSF

Dans cette partie, nous présentons les éléments de base pour le fonctionnement d'un RCSF. Dans un premier temps, nous décrivons les architectures communes d'un RCSF, puis nous citons les différentes topologies de réseau et la façon avec laquelle les nœuds sont déployés sur la zone surveillée. Enfin, nous présentons les différents modes de communication des nœuds.

1.4.1 Architectures de RCSF

Dans un RCSF de nombreux nœuds capteurs sont dispersés sur la zone surveillée. Selon l'objectif et les exigences de l'application, les nœuds capteurs doivent principalement détecter un événement, traiter les données et les transférer à la station de base. Les auteurs de [27] ont classifié l'architecture de réseaux en deux classes (voir figure 1.3). La première classe est nommée architecture plate dont tous les nœuds déployés effectuent les mêmes tâches et que chacun peut envoyer des données à la station de base soit directement, soit à travers ses nœuds voisins via un chemin à sauts multiples. La seconde classe est appelée architecture hiérarchique dans laquelle les nœuds sont regroupés en cluster et supervisés par un chef de cluster (Cluster Head (CH)). Tous les nœuds du même cluster doivent envoyer les données détectées à leur CH, qui les relaie ensuite, soit au nœud collecteur, soit à un autre CH proche du nœud collecteur.

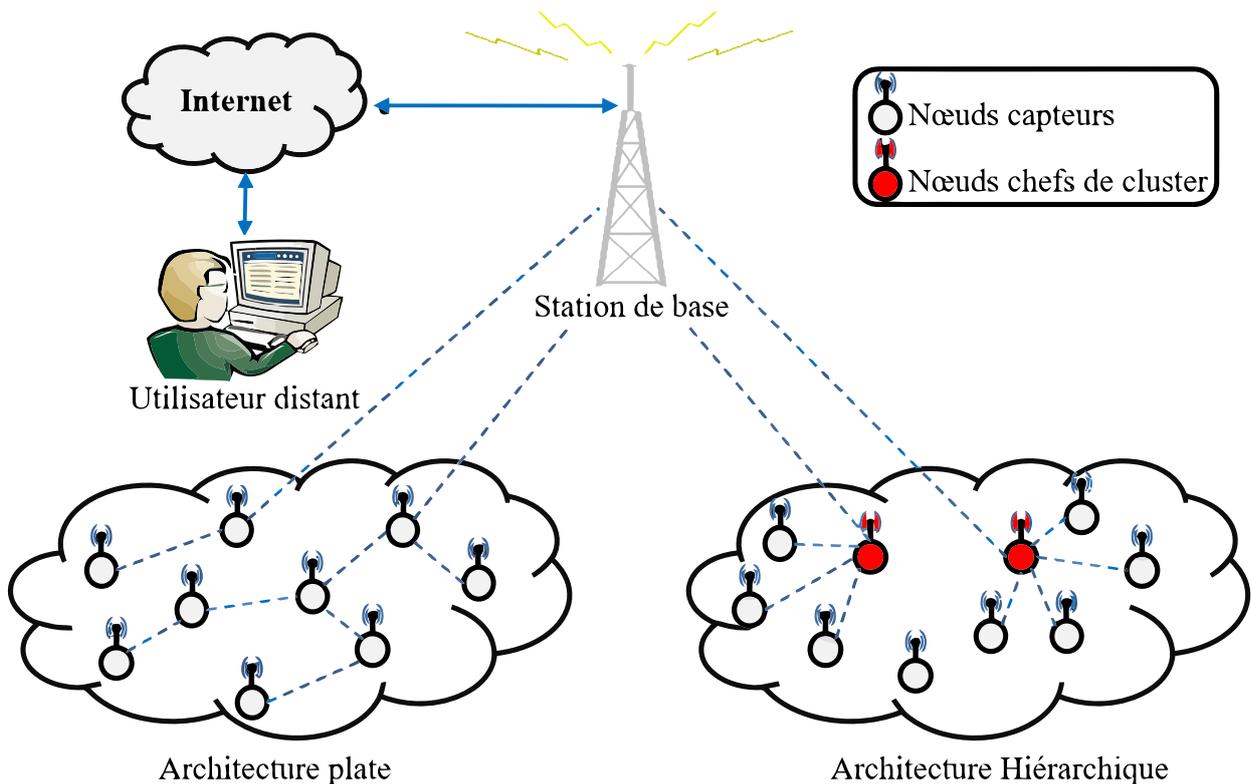


Figure 1.3 – ARCHITECTURE D'UN RCSF

Dans un réseau de capteurs sans fil nous distinguons quatre types de nœuds capteurs [28] :

- **Capteur miniaturisé** : est un très petit dispositif de l'ordre de mm^3 , avec une faible bande passante (inférieure à 50Kbps). L'un des plus petits nœuds capteurs au monde est le *Spec* [29], conçu par l'université de Berkeley.

- **Capteur général** : est un dispositif capable de détecter les données et de les relayer via d'autres nœuds. L'un des capteurs les plus populaires utilisé pour les applications réelles est *MicaZ*[138]. Sa taille est d'environ 10 cm^3 , il devient aujourd'hui une référence pour la recherche scientifique dans le domaine de RCSF.
- **Capteur à bande passante élevée** : est un dispositif conçu pour transférer des données volumineuses (vidéo, image, etc.). L'un des exemples les plus utilisés est le *Imote* [30], ce nœud capteur utilise la technologie Bluetooth [31].
- **Capteur de passerelle** : est un nœud capteur destiné à relayer les données collectées dans un RCSF vers un réseau traditionnel (Ethernet, 802.11). *Stargate* est un exemple typique pour ce type de nœud capteur.

1.4.2 Topologies

Dans un RCSF, il existe trois modèles typiques de topologie de réseau (voir figure 1.4) :

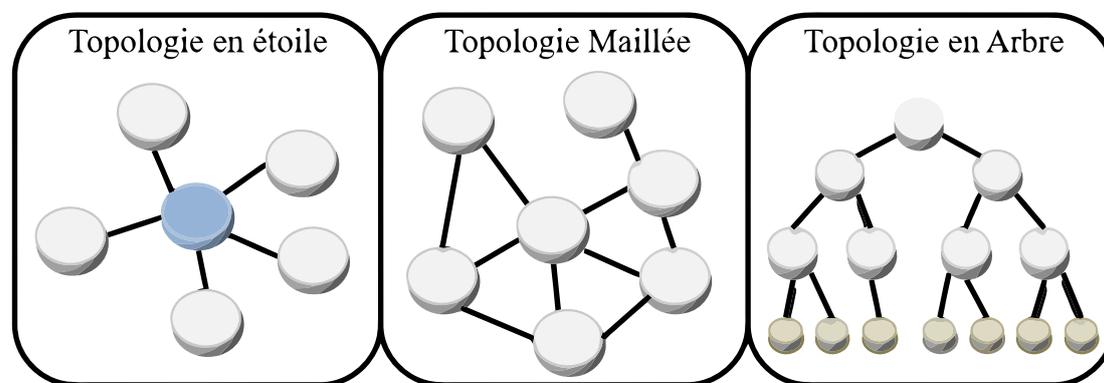


Figure 1.4 – LES TYPES DE TOPOLOGIES DES RCSF

Topologie en étoile : dans laquelle un ensemble de nœuds capteurs sont connectés à un nœud central. Généralement, le nœud central assure la synchronisation entre les nœuds et joue le rôle de collecteur de données. Dans cette topologie nous trouvons deux types de communication [32] :

- Communication à saut unique : où tous les nœuds sont situés dans la même couverture du nœud central. Dans ce cas, la couverture du réseau est limitée par celle du nœud central, ce qui limite le nombre de nœuds déployés dans le réseau.
- Communication à sauts multiples : dont les nœuds peuvent relayer leurs données via d'autres nœuds situés plus près du nœud central. Dans ce cas, les nœuds peuvent effectuer une mesure et agir en même temps comme émetteur intermédiaire.

Topologie en arbre : les nœuds sont organisés à plusieurs niveaux (structure hiérarchique). Le premier niveau est composé uniquement de nœuds terminaux permettant de détecter des événements et les transmettre à leurs parents situés au niveau supérieur. Et la même structure est répétée dans le niveau suivant, jusqu'à ce que nous obtenions le nœud récepteur dans le niveau supérieur. Le problème se pose lorsqu'il y a des pannes dans certains nœuds parents, auquel cas il y a une rupture entre les nœuds de niveaux adjacents.

Topologie maillée : dans cette topologie, les nœuds ne dépendent pas d'un autre nœud spécifié, ils ont tous les mêmes capacités. Chaque nœud peut communiquer avec n'importe quels nœuds situés dans sa portée de couverture. Comme il peut aussi détecter et transmettre ses

propres données ou celles de ses voisins au nœud récepteur. Cette topologie est la plus utilisée, car elle permet de couvrir de grandes surfaces et ne nécessite aucune configuration préalable.

1.4.3 Déploiement des nœuds

Selon les objectifs et les exigences de l'application, nous choisissons la méthode avec laquelle les nœuds capteurs peuvent être déployés sur la zone surveillée. Le déploiement des nœuds dépend principalement du nombre de nœuds requis et de la nature du champ surveillé (supervision domestique, surveillance, etc.). Sur cette base, nous pouvons différencier deux méthodes de déploiement des nœuds capteurs :

- **Déploiement aléatoire** : dans ce modèle de déploiement, les nœuds capteurs sont dispersés de manière aléatoire dans toute la zone surveillée. Cette méthode est très utile dans le cas où les zones sont inaccessibles (séisme, zones touchées par les inondations, champs de bataille, régions contaminées [6], etc.). Dans ce cas, les nœuds capteurs sont projetés par un avion survolant toute la zone surveillée. Ce type de déploiement peut entraîner un manque de surveillance dans certaines zones du réseau, il ne fournit pas une distribution uniforme, ce qui pose le problème de la couverture. En même temps, nous pouvons obtenir une couverture redondante, ce qui ne peut prolonger la durée de vie du réseau que si nous utilisons des protocoles de communication capables de gérer efficacement les redondances [33].
- **Déploiement déterministe** : ce modèle permet de placer chaque nœud à son emplacement spécifié. La position de chacun est déjà planifiée en fonction des tâches qu'il est chargé d'exécuter et de son interaction avec ses nœuds voisins. La faisabilité de ce modèle de déploiement dépend de la nature de la zone surveillée. En outre, ce modèle peut être irréalisable lorsqu'un grand nombre de nœuds doivent être déployés. L'avantage majeur de ce modèle est que nous pouvons remplacer les nœuds épuisés par d'autres afin de prolonger la durée de vie du réseau.

1.4.4 Modèles de communication et de transmission de données

Généralement, la communication entre les nœuds du réseau (nœud feuille, coordinateur, etc.) dépend de l'application. Cependant, on peut classer les modes de communication en trois types de modèles [34] : communication en diffusion, communication convergente et communication de points locaux. Lorsqu'un nœud doit transmettre le même message (paquets de contrôle) à tous les autres nœuds, il utilise le mode de communication en diffusion. Dans ce modèle, un message est envoyé à tous les capteurs déployés dans le réseau. Dans le deuxième modèle qui concerne la communication convergente, un ensemble de nœuds de capteurs transmettent leurs messages à un capteur particulier. Par exemple, nous trouvons ce mode de communication entre les membres du cluster et le CH, où les membres du cluster doivent envoyer leurs données uniquement à leur CH (modèle de communication basé sur le cluster). Tandis que la communication de points locaux est utilisée lorsque les nœuds communiquent uniquement avec leurs voisins.

La nature des applications peut également définir la manière avec laquelle les données sont générées sur le réseau. En règle générale, nous pouvons classer le modèle de génération de données en quatre catégories [35] ; données périodiques, données demandées, données événementielles et hybrides.

Le premier type concerne la transmission périodique des mesures détectées à la station de base ; Tous les nœuds déployés sur le réseau doivent envoyer régulièrement des informations relatives à la zone surveillée (telles que la température, la pression, l'humidité, etc.). Ce modèle est généralement utilisé dans les applications d'agriculture. Dans le second modèle, les nœuds ne transmettent les données que s'ils reçoivent des messages de demande du nœud récepteur.

Ces demandes peuvent être diffusées vers tous les nœuds du réseau ou uniquement destinées à un ensemble spécifié de nœuds. Concernant le troisième modèle de génération de données, les nœuds sont censés signaler uniquement les événements survenus dans la zone surveillée, par exemple lorsque la température dépasse un seuil spécifié, ou en cas de détection d'intrusion. La surveillance de forêt [36] est l'exemple parfait d'application d'un modèle de trafic événementiel. Le quatrième modèle combine principalement deux ou trois des modèles précédents.

1.4.5 Durée de vie d'un RCSF

La durée de vie d'un RCSF est le critère le plus cruciale pour ces réseaux ; cela reflète le bon fonctionnement du réseau. La durée de vie définit combien de temps le réseau est capable de rester en vie et remplir ses tâches (détecter et communiquer des données à un nœud collecteur). Dans la littérature, les auteurs ont toujours tenté de déterminer une définition pour de la durée de vie d'un RCSF, et d'après leurs travaux la durée de vie peut être déterminée selon trois aspects : la couverture, la connectivité et le nombre de nœuds restant actifs sur le réseau.

La couverture de la zone surveillée : dans cette définition, la durée de vie du réseau est limitée par la surface de la zone couverte comparée à la surface totale de la zone surveillée. Le dysfonctionnement du réseau est déclaré lorsque toutes les régions de la zone surveillée ne sont pas couvertes par des nœuds capteurs. Dans [37] les auteurs proposent de résumer la durée de vie du réseau dans la durée pendant laquelle toute la zone surveillée est encore couverte par les K nœuds (dans [38] les auteurs définissent K à 1 nœud). Alors que, dans [39] les auteurs spécifient que le réseau est toujours considéré opérationnel tant que la surface α de toute la zone est couverte par au moins un nœud.

La connectivité entre les nœuds : dans [40] les auteurs ont déclaré que le réseau est toujours actif jusqu'à ce que le collecteur devienne inaccessible par au moins un nœud (les nœuds ne sont pas en mesure de trouver le chemin d'accès au nœud du collecteur). Cependant, dans [41] les auteurs ont indiqué que le réseau était toujours considéré comme actif tant que le nombre de nœuds connectés est supérieur ou égale un seuil spécifié. Alors que dans [13] la durée de vie du réseau est limitée du moment où le réseau est partitionné en deux sous-réseaux, ce qui signifie l'épuisement de certains nœuds intermédiaires.

Le nombre de nœuds en vie sur le réseau : plusieurs travaux déterminent la durée de vie du réseau en fonction du nombre de nœuds encore en vie dans toute la zone surveillée. D'après [42] un réseau est considéré non actif lorsque le premier nœud épuise toutes ses ressources énergétiques. Cependant, dans [43] la durée de vie est limitée par la durée de vie de α nœuds surveillant le réseau. Inversement, dans [44] le réseau est considéré fonctionnel jusqu'à épuisement du dernier nœud. Alors que, les auteurs de [45] résumant la durée de vie du réseau dans celle du CH. Cependant, dans [13] les auteurs disent que le réseau est actif tant que 50% de tous les nœuds déployés dans le réseau sont en vie. Dans [46] ces définitions ne sont pas fiables car elles ne reflètent pas l'état réel de la couverture réseau lorsque nous avons une redondance des nœuds dans certaines zones et que la topologie a été modifiée. Nous pensons que la définition la plus pertinente est de lier la durée de vie du réseau aux besoins de l'application [47], parce que, tant que le réseau est capable de remplir toutes ses tâches, même si certains nœuds sont épuisés ou que nous perdons la connectivité entre certains nœuds, nous ne pouvons pas le considérer comme un réseau non opérationnel.

1.5 Sources de consommation d'énergie et de dissipation

Pour optimiser la durée de vie du réseau, nous devons contrôler la consommation d'énergie de tous les nœuds déployés dans ce réseau. Afin d'aboutir à cet objectif, nous pouvons économiser l'énergie consommée par les composants intérieurs du nœud capteur (processeur, mémoire, unité de détection et communication) et surtout celle due au fonctionnement de l'émetteur-récepteur.

Dans cette partie, nous résumons dans un premier lieu l'énergie consommée par toutes les unités du nœud capteur, Ensuite nous décrivons les sources de dissipation d'énergie nœud.

1.5.1 Sources de consommation d'énergie

La consommation énergétique provient principalement de trois unités : de détection, de communication et de traitement de données [3].

Unité de détection : cette unité pourrait être composée de simples capteurs mesurant des grandeurs physiques, telles que la température, l'humidité ou la pression, qui nécessitent quelques octets pour être codées. Tandis que, lorsque les nœuds sont dotés d'une caméra, ils ont besoin de milliers d'octets pour coder les images. Cette unité peut être soumise à des contraintes énergétiques en raison de trois facteurs [48], en premier lieu les transducteurs gourmands en énergie (tels que les capteurs multimédias [4] ou les capteurs biologiques [49], qui nécessitent une forte source d'énergie pour la réalisation de leurs tâches. Le convertisseur numérique pourrait être une source de consommation d'énergie, comme dans les capteurs acoustiques [50] et sismiques [51], mais pourrait aussi être coûteux en raison du processus d'acquisition de données, où certains nœuds possèdent plusieurs capteurs. Des schémas d'acquisition de données peuvent être utilisés, tels que l'échantillonnage hiérarchique [52] basé sur une sélection dynamique du capteur pouvant être activé afin d'obtenir un compromis entre détection et conservation de l'énergie [53].

Unité de traitement : de manière générale, afin de gérer efficacement l'énergie consommée par cette unité, le microprocesseur peut être dans trois modes ; veille, endormi et actif. Par exemple, le *MSP430* consomme 3 mW en mode actif, $98\ \mu\text{W}$ en mode veille et seulement $15\ \mu\text{W}$ en mode endormi. En outre, *Imote2* a deux modes de fonction : le mode veille où sa consommation électrique est de 37 mA , et le mode veille profonde où le microcontrôleur ne dépasse pas $500\ \mu\text{A}$. Alors que, dans [5], les auteurs démontrent que le coût énergétique de la transmission d'un KB sur 100 mètres par radio est à peu près l'énergie nécessaire pour traiter 3 millions d'instructions. Suite à cette disparité, il est vivement recommandé de traiter les données localement (au niveau du nœud). De plus, cette unité peut réduire la consommation d'énergie lorsque des nœuds sont déployés de manière dense, si des algorithmes intelligents sont utilisés pour filtrer et détecter les données redondantes. Par exemple, les méthodes de fusion visent à filtrer les données bruitées [54] et à effectuer des prévisions de mesure afin de réduire la charge de trafic de données.

Unité de communication : l'émetteur-récepteur fonctionne en quatre modes [55] : veille, endormi, émission et réception. En règle générale, le coût énergétique de la communication comprend la consommation d'énergie liée à la transmission, à la réception et à l'écoute [56]. Selon [57] la transmission d'un bit consomme deux fois plus d'énergie que de le recevoir. Ainsi, de nombreux algorithmes [58] ont été proposés afin de réduire l'énergie consommée par cette unité en réduisant les échanges de trafic entre les nœuds. Une autre source importante de consommation d'énergie est la transition entre deux modes de fonctionnement, due à l'activation des circuits électroniques.

1.5.2 Sources de la dissipation d'énergie dans la couche MAC

L'unité de communication est considérée comme la première source entraînant une consommation significative, en particulier au niveau de la couche MAC qui contrôle l'accès au support de transmission. Dans [13], les auteurs tentent d'identifier les principales sources de gaspillage d'énergie au niveau de l'unité de communication, à savoir : « *overhearing* », « *idle listening* », « *collision* » et « *Overemitting* ».

L'écoute passive « *idle listening* » : c'est le cas où le nœud reste tout le temps en attente de la réception des messages éventuels. Cet état est très coûteux en énergie en cas de faible trafic dans le réseau. La seule option pour éviter le gaspillage d'énergie dans ce mode consiste à éteindre l'émetteur-récepteur avec une fréquence raisonnable (sans augmenter la consommation d'énergie due à la transition entre les modes veille et écoute). Dans [59], les auteurs prouvent que la consommation d'énergie dans cet état est la même que celle consommée en mode réception pour TmoteSky [60].

« *Collision* » : c'est le cas où un nœud retransmet le même paquet plusieurs fois à cause des collisions, et par conséquent rester actifs pour le répéter et vérifier qu'il est bien reçu par le destinataire, ce qui engendre un grand gaspillage d'énergie. Ainsi, les nœuds sont obligés de transmettre à nouveau ces deux trames plusieurs fois. En plus, les collisions entraînent une dégradation des performances du réseau en termes de qualité de service. Ce type de problèmes ne concerne que les protocoles MAC basés sur la contention.

La sur-écoute « *Overhearing* » : lorsqu'un nœud reçoit un message qui ne lui est pas destiné, la puissance consommée lors de la réception et du traitement de ce message est considérée comme une énergie gaspillée. Le coût de l'énergie consommée, en raison de la surchauffe, pourrait être augmenté en cas de forte charge de trafic sur le réseau.

La surémission « *Overemitting* » : ce problème survient lorsqu'un nœud veut transmettre des données à un autre qui est inaccessible (lorsqu'il ne peut pas recevoir de messages). Dans ce cas, le nœud émetteur doit réessayer d'envoyer des données, ce qui provoque un gaspillage d'énergie.

1.6 Quelques approches d'économie d'énergie proposées dans la littérature

Dans la littérature, de nombreux travaux ont été proposés pour résoudre le problème de gaspillage d'énergie. Les techniques de base proposées pour conserver l'énergie et étendre la durée de vie du réseau peuvent être classées en cinq catégories [52] :

Techniques de duty-cycle ou protocoles de gestion d'énergie : le duty-cycle fait référence au rapport entre le mode actif et le mode veille pendant une période ou une trame. L'idée derrière cette technique est d'éteindre l'émetteur-récepteur chaque fois que cela est possible. Pendant ce temps, la communication via le support sans fil n'est pas autorisée, ce qui fait diminuer la consommation d'énergie des nœuds. La plupart de ces techniques reposent sur l'alternance de l'émetteur-récepteur entre deux modes de fonctionnement : actif et inactif. Dans le mode inactif, les nœuds capteurs éteignent leurs interfaces radio lorsqu'ils ne sont pas censés transmettre ou recevoir des données. Cependant, dans le mode actif, les nœuds activent leurs émetteurs-récepteurs dès qu'il y a des messages à transmettre ou à relayer. Suivant [52], ces techniques sont généralement utilisées dans les couches MAC et elles sont subdivisées en trois sous-classes [52] : protocoles MAC basés sur la contention [61] [62] [63], les protocoles basés sur un accès temporel multiple (Time Division Multiple Access (TDMA)) [64] [65], et les protocoles hybrides combinant les deux [66].

Techniques basées sur le contrôle de la topologie : l'idée principale de ces techniques est de placer les nœuds inutilisés pour garantir la connectivité et la couverture du réseau. Dans la plupart des cas, les nœuds sont déployés de manière aléatoire, ce qui peut créer une redondance. Et dans certaines applications, il est difficile de déployer d'autres nœuds. Pour cette raison, les auteurs de [13] et [67] présentent une synthèse des techniques proposées qui permettent de sélectionner des nœuds inutiles suivant leur position dans la zone surveillée. Ces approches sont appelées protocoles basés sur la localisation, tels que le protocole de fidélité géographique adaptée (Geographic Adaptive Fidelity (GAF)) [68]. D'autre part, ces nœuds redondants peuvent être sélectionnés dynamiquement de manière à maintenir la connectivité du réseau ou la couverture de toutes les zones du réseau (couverture de détection complète [69]). Ces techniques s'appellent les protocoles basés sur la connectivité, à savoir le protocole Span [70].

Techniques de traitement local de données : il est prouvé que l'énergie requise pour transmettre 1 bit est mille fois plus élevée que celle consommée en exécutant des instructions [5]. Ainsi, au lieu de transmettre chaque donnée mesurée, il est préférable de la traiter localement ; Les nœuds envoient des données uniquement s'il existe des variations dans les mesures ou si elles dépassent un seuil critique. Pour réduire la consommation d'énergie de l'interface radio, ces techniques sélectionnent les mesures inutiles selon leur corrélation spatiale ou temporelle [71] (informations redondantes). Ces approches améliorent l'efficacité énergétique et fournissent des techniques pour gérer l'acquisition de données lorsque le nœud capteur consomme beaucoup d'énergie [48]. De plus, en cas de déploiement dense, les nœuds peuvent collaborer entre eux pour réduire la consommation d'énergie de transmission. Cette politique réduit considérablement le trafic circulant sur le réseau. Dans la littérature, Il existe plusieurs approches dérivées de cette classe, telles que la compression des données (codage des informations au niveau des nœuds sources et leur décodage au niveau du récepteur) [72], les méthodes de prédiction des données, etc.

Techniques d'organisation d'échange de trafic : l'objectif principal de ces techniques est de réduire l'énergie gaspillée à cause des collisions. Elles consistent à établir une méthode efficace pour accéder au support, tels que (Request to Send/Clear to Send (RTS/CTS)) qui permet de résoudre le problème des stations cachées [73], (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA)) slotté du standard IEEE 802.15.4 [74], etc.

Techniques basées sur le routage : ces techniques visent à rechercher des itinéraires en fonction de l'énergie restante de chaque nœud du chemin entre la source et la destination. Les nœuds qui ont plus d'énergie sont plus privilégiés que les autres [75]. Nous trouvons dans cette classe de nombreuses approches telles que les protocoles centrés sur les données, dans lesquels seuls les nœuds interrogés par le récepteur doivent transmettre des informations sur le réseau (Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN)) [76].

1.7 Protocoles MAC pour RCSF

Les protocoles MAC pour les RCSF ont été largement étudiés au cours des dernières décennies. Dans ce chapitre, nous discutons les principaux protocoles MAC conçus spécifiquement pour améliorer les performances de RCSF. Selon la manière dont le support sans fil est géré, nous avons classé les protocoles MAC en quatre catégories. Les protocoles MAC basés sur la contention (accès aléatoire), les protocoles MAC basés sur l'échantillonnage de préambule et l'écoute de faible puissance, les protocoles MAC basés sur la planification (accès déterministe), et les protocoles MAC hybrides. La figure 1.5 donne le schéma de base classifiant les protocoles MAC les plus répandus dans la littérature.

Plusieurs protocoles MAC ont été proposés pour répondre aux exigences de la conception

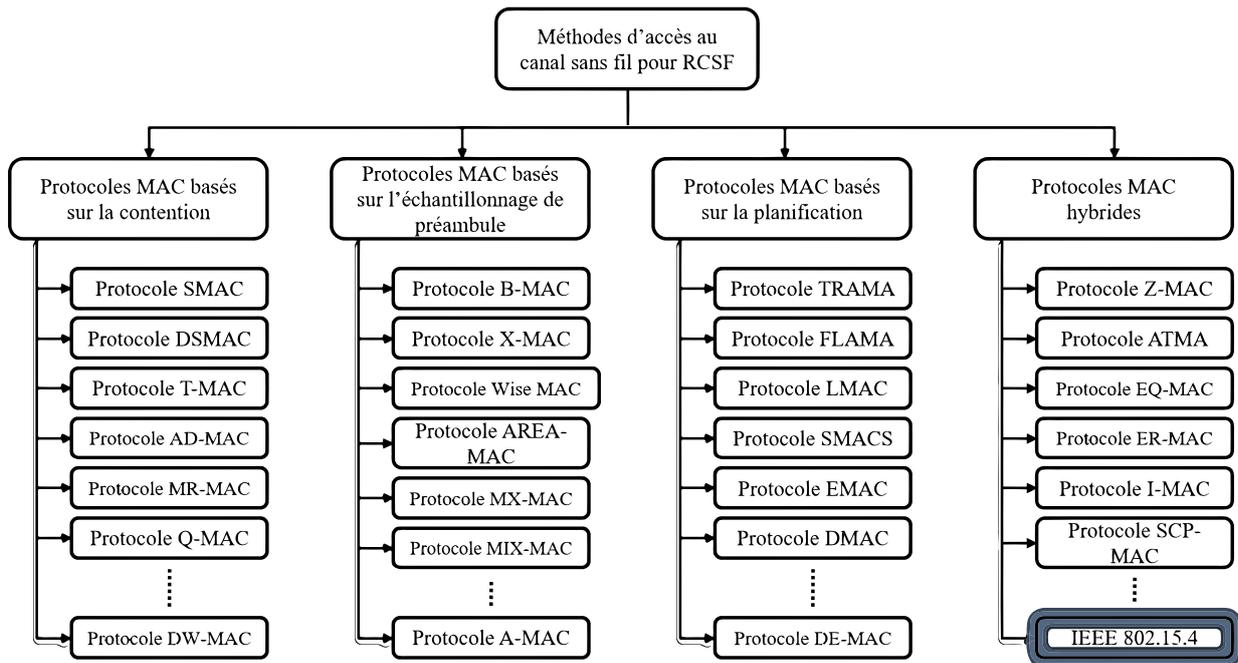


Figure 1.5 – TYPES DE PROTOCOLES MAC DÉDIÉS AUX RCSF

strictes des RCSFs. Cette section traite de façon générale les différents types de ces protocoles en les catégorisant dans différentes classes d'accès au canal. Dans ce qui suit, nous discuterons le mode de fonctionnement de principales classes des protocoles MAC dédiés pour les RCSF.

1.7.1 Protocoles MAC basés sur la contention

Les nœuds basés sur la contention travaillent à l'acquisition du canal. Par conséquent, le nœud de réseau entre en concurrence avec ses voisins pour obtenir le canal. Ce processus sera effectué lorsque le nœud écoutera le signal « porteuse » avant de commencer la transmission de données. Si le signal est inférieur à un seuil, le nœud commencera sa transmission, sinon le nœud reportera la transmission pendant un certain temps de manière aléatoire. Ce report est généralement déterminé par un algorithme de backoff. Les applications de RCSF basées sur les événements utilisent des protocoles MAC basés sur la contention pour réduire la consommation de ressources de traitement. Cependant, les protocoles MAC basés sur la contention sont flexibles et dynamiques à l'échelle du réseau [77]. En outre, les informations de clustering et/ou de topologie ne sont pas requises pour leur fonctionnement. Ainsi, chaque nœud du réseau peut décider indépendamment de la contention sans contrôler les échanges de trames.

Dans ce cas, la transmission est exclusivement traitée par l'émetteur, de même, le problème de la station cachée peut survenir provoquant des collisions, sur-audition, écoute passive et réduction du débit.

1.7.2 Protocoles MAC basés sur l'échantillonnage de préambule et l'écoute de faible puissance (LPL)

Dans ce type de protocoles, des octets de préfixe supplémentaires appelés un préambule sont placés dans des paquets de données et envoyés sur le canal par le nœud émetteur. Le préambule envoyé vérifie que l'interface radio du nœud récepteur serait active avant que la charge utile de

données ne soit envoyée par le nœud émetteur. Si une activité radio est détectée au réveil, le nœud récepteur active son interface radio pour la réception de paquets de données. Sinon, le nœud récepteur repasse en mode veille jusqu'au prochain intervalle de vérification. Pour traiter cette surdité, le nœud émetteur utilise un long préambule de taille égale à l'intervalle de vérification du récepteur afin de s'assurer que le nœud récepteur se réveille et exécute l'échantillonnage de canal dans la durée pendant laquelle le préambule est envoyé au moins une fois [78].

Cependant, aucune planification active/veille commune ni de synchronisation ou mise en cluster n'est requise. Pendant la courte période de réveil, les récepteurs consomment moins d'énergie, mais les expéditeurs dépensent plus d'énergie lors de la transmission de préambules étendus, ce qui entraîne une utilisation inutile de l'énergie, une écoute excessive des récepteurs non ciblés et une latence inutile à chaque saut. Un autre problème lié à ce type de protocoles est que la réduction du duty-cycle prolonge l'intervalle de vérification, ce qui entraîne une augmentation des coûts de transmission en raison des préambules longs de l'expéditeur. Ces problèmes peuvent être résolus en utilisant un nombre réduit de préambules, des duty-cycles flexibles et une redondance réduite [79].

1.7.3 Protocoles MAC basés sur la planification

Au cours de la phase d'initialisation, les protocoles basés sur la planification attribuent des liaisons sans collision entre les nœuds voisins. Cependant, ces liaisons peuvent être attribuées sous forme de bandes de fréquence (Frequency Division Multiple Access (FDMA)), de tranches de temps (TDMA) ou de codes (Code Division Multiple Access (CDMA)). En raison de la complexité des techniques FDMA et CDMA, les RCSF utilisent donc la technique TDMA en tant que méthode de planification afin de réduire la complexité de calcul [80]. Dans la technique TDMA, le temps est divisé en plusieurs slots. Ces slots sont ensuite attribués à tous les nœuds voisins. Un algorithme centralisé contrôle l'affectation de slots de temps aux différents nœuds du réseau, de plus, un slot de temps peut être fixe ou calculé à la demande (ou hybride).

D'autre part, un nœud n'a pas besoin d'entrer en compétition avec ses voisins, car c'est le seul qui peut accéder à son slot de temps. En effet, la minimisation des collisions, de la sur-écoute et l'évitement implicite de l'écoute passive sont tous considérées comme les principaux avantages des protocoles basés sur la planification. De ce fait, ces protocoles fournissent également un délai de bout en bout réduit et prévisible. Le délai moyen de mise en file d'attente est normalement élevé, car le nœud doit attendre son slot de temps avant d'accéder au canal. Cependant, il existe d'autres problèmes majeurs liés à ces protocoles, tels que : trafic supplémentaire, manque de capacité d'adaptation, extensibilité réduite et faible débit.

Dans ce type de protocoles, l'allocation de planifications TDMA est une tâche très difficile. Une communication entre les nœuds voisins est également impossible car les nœuds sont normalement autorisés à communiquer uniquement avec l'autorité centrale. Cependant, les protocoles MAC basés sur TDMA ont attiré l'attention des chercheurs des réseaux de capteurs. Cette étude décrit certains des protocoles représentatifs de cette catégorie. Dans [81], de nombreux types de protocoles MAC sans fil basés sur la technique TDMA ont été proposés. Dans le chapitre suivant nous étudierons les protocoles les plus cités dans la littérature.

1.7.4 Protocoles MAC hybrides

Afin d'atteindre une amélioration conjointe, les protocoles MAC hybrides combinent les points forts de deux ou plusieurs protocoles MAC différents. Habituellement, les protocoles MAC hybrides associent un mécanisme synchronisé à un autre asynchrone. Bien que les protocoles

hybrides cumulent les avantages de plusieurs mécanismes, ils peuvent également comporter des problèmes de mise à l'échelle et de complexité pour le maintien de deux ou plusieurs modes de travail. Le standard IEEE 802.15.4 [74] est l'un des exemples les plus importants des protocoles hybrides, qui combine les atouts de la TDMA et de la CSMA tout en compensant leurs faiblesses. De même, le protocole (Zebra MAC (Z-MAC)) [66] et le protocole (Scheduled Channel Polling MAC (SCP-MAC)) [82] sont également deux exemples importants de ce type de protocoles.

1.8 Conclusions

Notre étude nous a permis de constater que la réduction de la consommation d'énergie est l'objectif le plus important de la majorité des solutions proposées dans la littérature. Pour pouvoir comprendre leurs concepts, nous avons résumé les différents principes de fonctionnement des RCSF, en termes d'architecture et de topologie de réseau, de déploiement de nœuds et de modèles de génération de données. Nous avons également abordé les principales sources de consommation et de dissipation d'énergie au niveau d'un nœud de capteur. Nous avons également fourni un aperçu des techniques de conservation de l'énergie proposées dans la littérature pour prolonger la durée de vie de réseau.

Les exigences des RCSF poussent les chercheurs à créer de nouvelles approches et techniques différentes de celles utilisées dans les réseaux sans fil traditionnels (tels que IEEE 802.11) qui se caractérisent par une grande complexité. Ils ne considèrent pas les ressources énergétiques limitées et ignorent les besoins en temps réel de certaines applications, ce qui les rend inadaptées aux RCSF. Dans le chapitre suivant, nous présenterons les principales solutions originales proposées au niveau de la couche MAC pour améliorer les performances des RCSF.

PROTOCOLES MAC DÉTERMINISTES DÉDIÉS AUX RCSF

Sommaire

| | | |
|--------|--|----|
| 2.1 | Protocole TRAMA | 21 |
| 2.2 | Protocole FLAMA | 22 |
| 2.3 | Protocole LMAC | 23 |
| 2.4 | Protocole AI-LMAC | 24 |
| 2.5 | Protocole MC-LMAC | 25 |
| 2.6 | Protocole SMACS | 26 |
| 2.7 | Protocole EMACS | 26 |
| 2.8 | Protocole DMAC | 27 |
| 2.9 | protocole DE-MAC | 28 |
| 2.10 | Standard IEEE 802.15.4/Zigbee | 29 |
| 2.10.1 | IEEE 802.15.4 WPAN | 30 |
| 2.10.2 | Architecture des périphériques LR-WPAN | 31 |
| 2.10.3 | La couche physique du standard IEEE 802.15.4 | 32 |
| 2.10.4 | La couche MAC du standard IEEE 802.15.4 | 34 |
| 2.10.5 | Limitations identifiées dans IEEE 802.15.4 | 41 |
| 2.11 | Conclusion | 42 |

Le présent chapitre est réparti en deux parties. Dans la première partie, nous présentons les protocoles MAC basés sur la planification les plus cités dans la littérature. Précisément, Nous décrivons quelques protocoles MAC déterministes qui se basent sur un accès séquentiel selon un découpage temporel TDMA. Dans la seconde partie, nous donnons une étude détaillée de la technologie IEEE 802.15.4 qui est considérée comme étant le standard le plus utilisé pour les réseaux de capteurs sans fil. Nous expliquons les différentes fonctionnalités de cette norme en insistant sur la couche MAC.

2.1 Protocole TRAMA

Le protocole TRAffic-Adaptive Medium Access control (TRAMA) [83] basé sur l'algorithme TDMA, a été proposé pour améliorer l'utilisation de la TDMA classique de manière économe en énergie. Une trame du protocole TRAMA est découpée en plusieurs slots. Les slots d'accès aléatoire qui occupent le début de la trame et les slots d'accès programmé (déterministe) qui apparaissent à la fin de la trame (voir figure 2.1). Ces slots de temps ne seront alloués qu'aux nœuds qui ont des données à transmettre.

Le protocole TRAMA repose sur trois mécanismes :

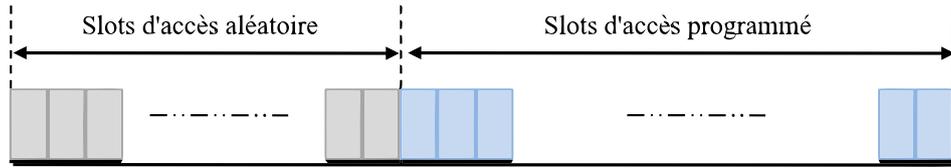


Figure 2.1 – FORMAT D'UNE TRAME TRAMA

- **Le protocole voisin (Neighbor Protocol (NP))** : ce protocole permet aux nœuds d'échanger leurs informations à un saut, afin d'obtenir les informations sur la topologie complète des nœuds situés à deux sauts.
- **Le protocole d'échange de calendrier (Schedule Exchange Protocol (SEP))** : ce protocole est utilisé par les nœuds pour échanger leurs calendriers (les calendriers contiennent des informations sur le trafic à émettre, ainsi que leurs récepteurs potentiels). Avant de commencer une nouvelle transmission, chaque nœud doit annoncer son calendrier en utilisant le protocole SEP.
- **Algorithme d'élection adaptée (an Adaptive Election Algorithm (AEA))** : ce mécanisme permet de sélectionner les émetteurs et les récepteurs durant les slots de temps destinés pour l'émission de données (accès déterministe). Un nœud n'est sélectionné à être un émetteur que s'il a la priorité la plus grande devant tous ses nœuds voisins situés à deux sauts. Ce type d'élection élimine le problème de la station cachée et garantit donc que tous les nœuds du voisinage à un saut de l'émetteur recevront des données sans collision.

Dans un slot de temps t , la priorité d'un nœud d'identité "id" est définie comme suit :

$$Prio(t, id) = MD_5(t + id). \quad (2.1)$$

Selon la priorité obtenue, un nœud d'identité "id" peut avoir soit l'état TX « transmission », soit RX « réception », ou SL « sommeil ».

Le protocole TRAMA offre une transmission de données sans collision grâce à son accès programmé (déterministe). Ainsi, il permet une préservation d'énergie plus élevée en mettant les nœuds non concernés par une transmission ou une réception en mode sommeil. En outre, l'accès aléatoire du TRAMA lui permet une adaptation rapide aux changements de trafic. Cependant, les frais de planification du protocole TRAMA introduit un temps de latence significatif. En plus, TRAMA nécessite une grande mémoire puisqu'il intègre des sous protocoles qui collectent des informations sur les voisins à deux sauts.

2.2 Protocole FLAMA

FLow-Aware Medium Access (FLAMA) [84] est un protocole proposé pour améliorer le protocole TRAMA. FLAMA divise le temps selon deux modes d'activités ; Les intervalles de temps à accès planifié (déterministe) et les intervalles de temps à accès aléatoire (voir figure 2.2).

Le protocole FLAMA fonctionne de la même façon que TRAMA, FLAMA a aussi besoin de découvrir le voisinage d'un nœud jusqu'au deuxième saut, et de savoir les informations concernant le flux de données des voisins à un saut. Cependant, FLAMA ne diffuse pas les calendriers durant les intervalles de temps à accès planifié, mais il échange les informations de flux de données liées à l'application durant les intervalles de temps à accès aléatoire. En plus, FLAMA

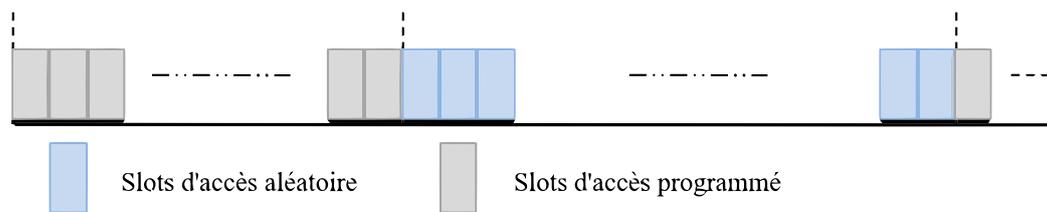


Figure 2.2 – DÉCOUPAGE TEMPOREL DE FLAMA

utilise une synchronisation globale du réseau basée sur une technique d'estampillage des trames.

Pour désigner les émetteurs et les récepteurs pour chaque slot de temps durant les intervalles à accès planifié, FLAMA applique un algorithme plus simple que l'algorithme AEA qui est utilisé par TRAMA. De même, FLAMA permet d'assurer des transmissions sans collision tout en permettant à un seul nœud d'émettre dans un voisinage à deux sauts.

Le protocole FLAMA permet une transmission de données sans collision, et améliore le temps de latence par rapport au protocole TRAMA grâce à l'utilisation des chemins définies à partir d'un arbre pour le cheminement multi-sauts. En plus, FLAMA utilise un algorithme d'élection simple que celui de TRAMA. Tous ces facteurs font du protocole FLAMA un protocole plus performant que TRAMA. Cependant, FLAMA surcharge le réseau par l'envoi des messages pour savoir le flux de l'application, ainsi que la phase transitoire de formation de réseau est trop long.

2.3 Protocole LMAC

Le protocole (Lightweight Medium Access Control (LMAC)) [85] a pour objectif est de minimiser l'overhead de la couche physique. En plus, LMAC permet de réduire le nombre de changements d'états du transmetteur qui consomment une énergie significative. Cette réduction de l'énergie revient en fait à adapter l'intervalle de sleep au volume du trafic de données.

Le protocole LMAC est basé sur la technique TDMA. En d'autres termes, le temps de communication est divisé en des slots de temps qui seront affectés aux nœuds pour émettre leurs données sans avoir à écouter le canal.

Contrairement aux protocoles classiques basés sur la technique TDMA, LMAC utilise un algorithme distribué pour assigner à chaque slot de temps un nœud qui le contrôle. En effet, Le nœud contrôleur d'un slot de temps envoie un message contenant deux parties : la première partie présente un message de contrôle de taille fixe contenant l'ID du nœud contrôleur du slot de temps, l'ID de ce slot de temps, la distance (en sauts) qui sépare le nœud de la station de base, l'adresse du destinataire et la taille de l'unité de données. Lors de la réception d'un message de contrôle, un nœud détermine s'il s'agit du destinataire souhaité, puis décide de rester en veille ou d'éteindre son interface radio jusqu'au prochain slot de temps. La deuxième partie contient l'unité de données.

Le champ des intervalles dans le message de contrôle est une suite de bits où un intervalle non affecté est représenté par 0 alors qu'un intervalle affecté est représenté par 1. En combinant les messages de contrôle de tous les voisins, un nœud peut déterminer les intervalles inoccupés. Le processus de réclamation des slots de temps commence au niveau de la station de base qui détermine ses propres slots de temps. Après une trame, tous les voisins directs de la passerelle connaissent les slots de temps de la passerelle et choisissent leurs propres slots de temps. Ce processus s'applique sur tout le réseau et à chaque trame, un nouvel ensemble de nœuds avec

une distance de saut plus grande de la passerelle détermine leurs slots de temps. Chaque nœud doit sélectionner des slots qui ne sont pas utilisés dans un voisinage à deux sauts. Les slots de temps sont sélectionnés aléatoirement.

Le protocole LMAC offre des communications sans collision et présente une efficacité énergétique, en outre il peut établir des programmes de transmission de manière distribuée. Cependant, on trouve dans ce protocole que la taille de slots de temps est fixe et les attributions de ces slots sont également fixes (sauf lorsqu'un nœud doit redémarrer le mécanisme de sélection de slots), ce qui peut entraîner une inefficacité de la bande passante. En plus lors du choix aléatoire du slot de temps, il est possible que plusieurs nœuds sélectionnent le même slot de temps. Cela entraînera une collision des messages de contrôle pendant ce slot.

2.4 Protocole AI-LMAC

Le protocole (an Adaptive, Information-centric and Lightweight MAC (AI-LMAC)) [86] est une extension du protocole LMAC. Son principal objectif est d'adapter les opérations du protocole MAC aux besoins de l'application, donc rendre le protocole AI-LMAC dépendant de l'application ce qui n'est pas le cas pour la majorité des protocoles MAC déterministes proposés pour les RCSF. Contrairement au protocole LMAC, qui autorise un nœud à ne posséder qu'un seul slot de temps, quel que soit le trafic de données émis par ce nœud, le protocole AI-LMAC autorise un nœud à posséder un slot de temps supplémentaire en fonction de la quantité de trafic de données qui le traverse. Ce qui permet une utilisation équilibrée de la bande passante.

Le protocole AI-LMAC établit une relation parent-enfant avec la passerelle. Lorsqu'une requête est transmise sur le réseau via la passerelle, elle utilise une table de distribution de données (Data Distribution Table (DDT)) (chaque nœud gère une table DDT qui enregistre l'historique des données pour une requête différente) pour prédire la quantité de données que leurs enfants vont générer en fonction de la requête et de l'historique en cours (voir la figure 2.3). Si un nœud parent se rend compte qu'un sous-ensemble d'enfants va transmettre un grand volume de données, il demande aux enfants de prendre plusieurs slots de temps dans les conditions actuelles.

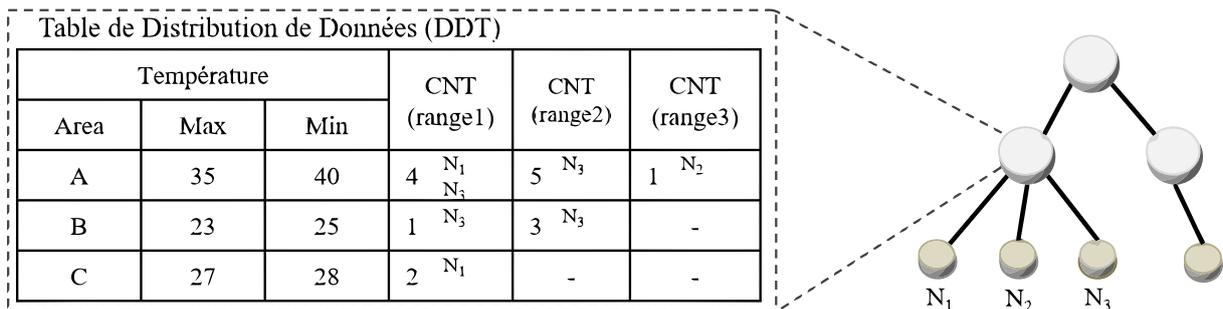


Figure 2.3 – FORMAT DE LA TABLE DE DISTRIBUTION DES DONNÉES

AI-LMAC introduit l'équité bidimensionnelle (horizontale et verticale) pour minimiser la latence globale du réseau et réduire la mise en mémoire tampon des messages dans le nœud.

Comme le protocole LMAC, AI-LMAC offre aussi des communications sans collision et présente une efficacité énergétique.

2.5 Protocole MC-LMAC

Le protocole (Multi-Channel MAC (MCMAC)) [87] est basé sur le protocole LMAC mono-canal. Son principale but est d'améliorer le débit en coordonnant les transmissions sur plusieurs Slots de temps et d'augmenter l'utilisation de la bande passante. Le protocole LMAC permet aux entités en communication d'accéder au support de transmission selon un calendrier défini (voir figure 2.4), chaque nœud utilisant périodiquement un intervalle de temps pour la transmission. Les principaux aspects de LMAC sont les suivants :

- **Auto-configuration** : LMAC peut fonctionner de manière ad hoc entièrement distribuée et ne nécessite pas de planificateur centralisé.
- **Adaptabilité aux changements** : le LMAC peut adapter le calendrier de communication en fonction de la dynamique du réseau, par exemple en raison de changements de topologie. Cette opération est effectuée par décision locale des nœuds sans recourir à un ordonnanceur centralisé.
- **Efficacité énergétique** : la planification temporelle présente l'avantage naturel d'avoir un accès au support sans collision qui évite le gaspillage d'énergie.

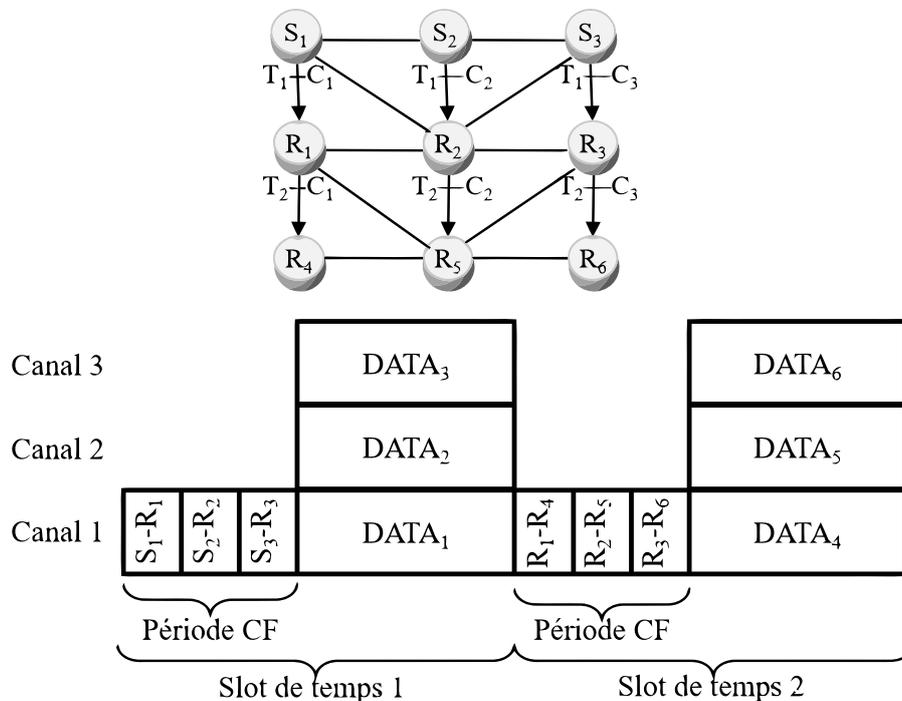


Figure 2.4 – MÉCANISMES DE COORDINATION ET DE STRUCTURATION DE MC-LMAC

De plus, les communications programmées facilitent la coordination des communications multicanaux. Les nœuds commutent leurs interfaces entre différents canaux, une coordination détaillée de la commutation de canal est requise entre les émetteurs et les récepteurs afin d'être sur le même canal au même moment. L'accès planifié surmonte cette complexité.

Un autre aspect clé de la communication par planification temporelle est la robustesse lors des pics de charge élevée. Les protocoles MAC basés sur la détection de porteuse alternatifs peuvent ne pas réussir à attribuer le support et peuvent donc entraîner des collisions lorsque le nombre de sources augmente. La communication programmée présente l'avantage d'un accès sans collision.

Dans MC-LMAC, la structure de slots de temps de LMAC est étendue en ajoutant une période de fréquence commune (CF) à laquelle on peut accéder selon une planification et est divisée en slots CF (le nombre de slots CF est égal au nombre de canaux, chaque slot est indexé par un numéro de canal).

2.6 Protocole SMACS

Le protocole (Self-organizing Medium Access Control for Sensor Network (SMACS)) [88] [89] est basé sur un accès séquentiel selon un découpage temporel TDMA, comme il repose sur détection des nœuds voisins. Pour configurer des liens ou des canaux pour les nœuds, SMACS repose sur les hypothèses suivantes :

- Chaque nœud peut accorder son émetteur-récepteur à un canal arbitraire parmi de nombreux canaux disponibles.
- Tous les nœuds divisent leur temps localement en super-trames de longueur fixes, où les super-trames sont subdivisées en plusieurs slots de temps (sans nécessairement avoir la même phase que les super-trames voisines).

Dans SMACS, un lien est directionnel, pour un fonctionnement bidirectionnel, deux liens de ce type sont nécessaires. La découverte de voisins et l'établissement de liens consistent en quatre cas différents.

Cas 1 : soient deux nœuds X et Y non connectés

- Le nœud X envoie un message d'invitation.
- Le nœud Y répond en disant que X n'est connecté à aucun autre nœud.
- Le nœud X demande à Y de choisir une paire slot de temps/fréquence pour le lien.
- Le nœud Y renvoie la spécification de liaison.

Cas 2 : X a des voisins alors que Y non

- Le nœud X construira la spécification du lien et demandera à Y de l'utiliser (puisque Y n'est pas attaché).

Cas 3 : X n'a pas de voisins, Y a des voisins

- Y choisi une spécification de lien.

Cas 4 : les deux nœuds ont déjà des liens

- Les nœuds échangent leurs calendriers et choisissent une paire slot de temps/fréquences libre mutuellement convenus.
- Les échanges de messages sont protégés par un « backoff » aléatoire.

Une fois le lien est établi, les nœuds se réveillent périodiquement (une fois par super-trame) dans les slots de temps de réception. Le récepteur est réglé sur le canal correspondant.

2.7 Protocole EMACS

Le protocole (EYES MAC (EMAC)) [90] est basé sur la technique TDMA, EMAC vise à améliorer l'efficacité énergétique. Ici, le temps est divisé en trames et chaque trame est divisée en slots de temps (voir figure 2.5).

Chaque slot de temps d'une trame peut appartenir à un seul nœud de réseau. Ce nœud

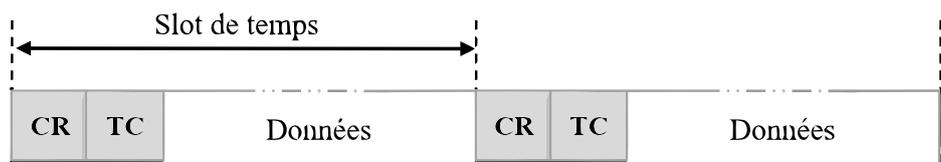


Figure 2.5 – FORMAT D'UNE TRAME EMACS

décide quelle communication doit avoir lieu dans son slot de temps et refuse ou accepte les demandes d'autres nœuds. Chaque nœud sélectionne de manière autonome un slot de temps qu'il souhaite posséder. Un slot de temps est sélectionné en fonction des slots de temps déjà occupés présentés par les nœuds voisins. Ces informations incluent les slots de temps connus des nœuds voisins à deux sauts, de sorte que les informations concernant le voisinage de second ordre soient respectées. Le signal radio s'est déjà assez atténué chez les voisins du troisième ordre, de sorte que les slots de temps puissent être réutilisés. Chaque nœud du réseau gère un tableau appelé tableau de planification dans lequel il stocke le planning de sa cellule (les nœuds directement connectés constituent une cellule) ainsi que les calendriers de ses voisins.

Dans EMAC, un slot de temps est divisé en trois parties : parties demande de communication (Communication Request (CR)), contrôle du trafic (Traffic Control (TC)) et données.

Les nœuds peuvent demander des données ou notifier la disponibilité des données pour le propriétaire du slot de temps dans la partie demande de communication (CR). Le propriétaire de slot transmet sa planification pour sa partie de données et diffuse le tableau de planification dans la partie de contrôle de trafic (TC), qui indique les autres parties de TC que le nœud écoute. Après la partie TC, la transmission du paquet de données suit la liaison montante ou la liaison descendante. Les parties CR et TC ne comprennent que quelques octets.

2.8 Protocole DMAC

Dynamic MAC (DMAC) [91] est un protocole MAC adaptatif à faible temps de latence et économe en énergie, conçu dans le but de collecter des données avec moins de temps de latence. La plupart des protocoles MAC basés sur le duty-cycle souffrent du problème d'interruption de transmission de données (Data Forwarding Interruption (DFI)) dû au délai de la mise en veille des nœuds situés entre la source et la station de base sur un chemin multi-sauts. En raison de la couverture limitée de la zone de surveillance du nœud, le processus de transfert de données s'arrête sur le nœud dont le saut suivant vers la station de base est en dehors de la plage de détection, ce qui entraîne une latence importante. Le protocole DMAC résout ce problème et réduit les problèmes d'interruption en permettant le transfert de paquets en continu. Il ajuste également de manière adaptative le duty-cycle en fonction de la charge de trafic dans le réseau.

Dans DMAC, Un intervalle est divisé en périodes de réception, d'envoi et de sommeil. Dans la période de réception, un nœud est censé recevoir un paquet et renvoyer un paquet ACK au nœud émetteur. Dans la période d'envoi, un nœud essaiera d'envoyer un paquet à son prochain saut et recevra un paquet ACK. En période de sommeil, les nœuds éteignent la radio pour économiser de l'énergie. Les périodes de réception et d'envoi ont la même longueur de μ , ce qui est suffisant pour l'émission et la réception d'un paquet. En fonction de sa profondeur d dans l'arborescence de collecte de données (voir figure 2.6), un nœud avance son schéma de réveil $d\mu$ de la planification du collecteur. Dans cette structure, la livraison des données ne peut être effectuée que dans un sens vers la racine. Les nœuds intermédiaires ont un slot d'envoi immédiatement après le slot de réception.

Lorsqu'un nœud doit envoyer plusieurs paquets, il doit augmenter son duty-cycle et celui des autres nœuds sur le chemin multi-sauts. Cela est fait en utilisant plus d'indicateur de données dans l'en-tête MAC et par un processus de prédiction de données qui permet aux nœuds suivants de réveiller juste avant le slot de temps de réception. DMAC utilise également des paquets More to Send (MTS) lorsqu'un nœud ne peut pas envoyer de paquet sur un canal occupé; un nœud envoie un paquet MTS à son nœud parent dans l'arborescence de collecte de données pour se réveiller avant son heure de réveil normale.

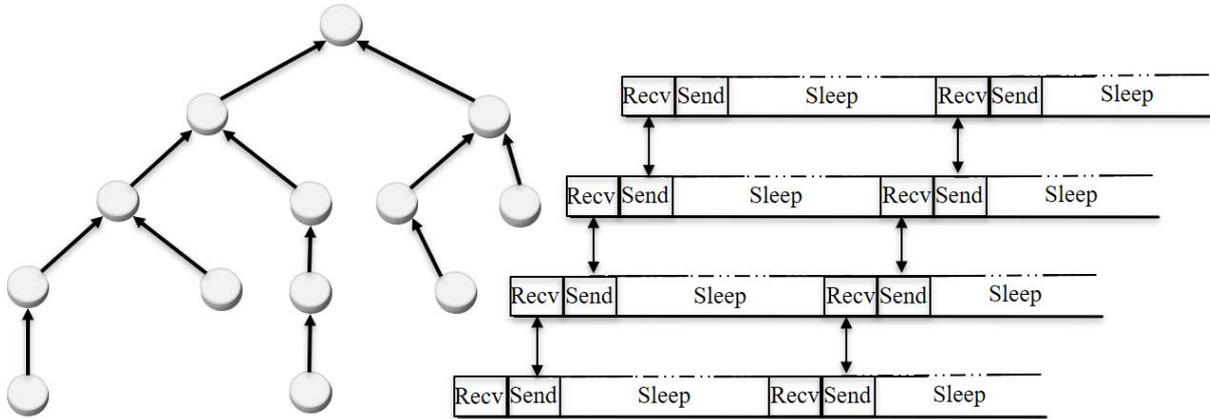


Figure 2.6 – ARBRE DE COLLECTE DE DONNÉES DMAC

Le protocole DMAC présente quatre avantages. Tout d'abord, les nœuds situés sur le chemin se réveillant de manière séquentielle pour transmettre un paquet au saut suivant, le délai de veille est éliminé s'il n'y a pas de perte de paquet due à une erreur de canal ou à une collision. Deuxièmement, une demande pour une période active plus longue peut être propagée jusqu'au récepteur, de sorte que tous les nœuds du chemin multi-sauts puissent augmenter rapidement leur duty-cycle afin d'éviter que des données ne restent bloquées dans des nœuds intermédiaires. Troisièmement, puisque les périodes actives sont maintenant séparées, les conflits sont réduits. Quatrièmement, seuls les nœuds du chemin multi-sauts doivent augmenter leur cycle de service, tandis que les autres nœuds peuvent toujours fonctionner sur le cycle de fonctionnement bas de base pour économiser de l'énergie.

2.9 protocole DE-MAC

Le protocole (Distributed Energy aware MAC (DE-MAC)) [92] est un protocole basé la technologie sur TDMA conçu dans le but de prolonger la durée de vie du réseau en traitant les nœuds critiques (faible consommation) de manière distribuée, ce qui permet aux nœuds de faible puissance de dormir plus de temps que les autres nœuds.

DE-MAC utilise le concept d'écoute et de sommeil périodiques. Un nœud de capteur éteint sa radio et passe en mode veille uniquement lorsqu'il se trouve dans son propre intervalle de temps et qu'il n'a rien à transmettre.

La radio doit rester en éveil dans les slots de temps attribués à ses voisins pour pouvoir recevoir des paquets. Initialement, chaque nœud est assigné à deux slots de temps pour la transmission. S'il n'a rien à transmettre il peut dormir. Chaque nœud sait quels slots de temps ses voisins utiliseront pour transmettre des paquets.

L'idée principale de DE-MAC est de laisser les nœuds échanger des informations sur leurs niveaux d'énergie. Sur la base de cette information sur le niveau d'énergie, chaque nœud décide

d'utiliser un ou deux des slots de temps pour la transmission. Un nœud de capteur peut être dans l'une des deux phases.

- **Phase de fonctionnement normal** : les nœuds fonctionnent normalement et acheminent les paquets de données vers la station de base.
- **Phase de vote** : les nœuds critiques entrent dans la phase de vote pour procéder à une élection locale afin de réajuster leurs slots de temps.

La phase de vote local est déclenchée par la criticité d'un nœud. Un nœud est dit critique si son niveau d'énergie est devenu inférieur à celui du vainqueur de l'élection précédente. Lorsqu'un nœud entre dans cette phase critique, une phase de vote local est déclenchée. Un nœud en phase de vote est gagnant si tous les niveaux d'énergie de ses nœuds voisins sont supérieurs à son propre niveau d'énergie. Sinon, il est déclaré perdant.

Les principaux avantages du protocole DE-MAC sont les suivants.

- La perte de paquets due aux collisions est absente car deux nœuds ne transmettent pas dans le même emplacement. Bien que des pertes de paquets puissent survenir pour d'autres raisons telles que des interférences, une perte de force du signal, etc.
- Aucun mécanisme de contention n'est requis pour qu'un nœud commence à détecter ses paquets, car les emplacements sont prédéfinis à chaque nœud. Aucun paquet supplémentaire de contrôle de surcharge n'est requis.

2.10 Standard IEEE 802.15.4/Zigbee

Le comité IEEE 802.15.4 a commencé à travailler sur une norme de faible débit de données, peu de temps après, l'alliance ZigBee et l'IEEE ont décidé d'unir leurs forces pour créer une norme sous un nom commercial « ZigBee », qui sera considérée comme une technologie de réseau sans fil à faible débit, faible consommation d'énergie et à faible coût, destiné aux applications d'automatisation et de contrôle à distance.

ZigBee devrait fournir une connectivité à faible coût et à faible consommation d'énergie pour les équipements nécessitant une autonomie de batterie allant de plusieurs mois à plusieurs années, mais ne nécessitant pas des débits de transfert de données élevés. De plus, ZigBee peut être implémenté dans des réseaux maillés de grande échelle. Cette technologie est caractérisée par sa faible portée (comprise entre 10 et 75 mètres, en fonction de l'environnement RF et de la consommation de puissance requise pour une application donnée). Ainsi qu'elle fonctionne dans le monde sans licence RF (2,4 GHz global, 915 MHz américain ou 868 MHz Europe). Son débit de données est de 250 kbps sur la bande 2,4 GHz, de 40 kbps sur 915 MHz et de 20 kbps sur 868 MHz.

IEEE et ZigBee Alliance ont travaillé en collaboration pour spécifier une pile protocolaire complète. IEEE 802.15.4 se concentre sur la spécification des deux couches inférieures de la norme (couche physique et couche liaison de données). D'autre part, ZigBee Alliance vise à fournir les couches supérieures de la pile de protocoles (du réseau à la couche d'application) pour la mise en réseau interopérable de données, des services de sécurité et une gamme de solutions de contrôle domestique et du bâtiment sans fil, fournir des tests de conformité, d'interopérabilité, de marketing de la norme et d'ingénierie avancée pour l'évolution de la norme. Cela garantira aux consommateurs d'acheter des produits de fabricants différents avec la certitude que les produits fonctionneront ensemble.

IEEE 802.15.4 [74] détaille la spécification des couches PHY et MAC en proposant des blocs de construction pour différents types de mise en réseau connus sous le nom d'arborescence

«étoiles, mailles et arbre». Les systèmes de routage réseau sont conçus pour garantir une économie d'énergie et une faible latence grâce à des slots de temps garantis. Une caractéristique unique de la couche réseau ZigBee est la redondance de la communication en éliminant le « point de défaillance unique » dans les réseaux maillés. Les fonctions clés de la couche PHY incluant la détection de l'énergie (Energy Detection (ED)) et de la qualité de la liaison (Link Quality Indication (LQI)), la technique (Clear Channel Assessment (CCA)) pour une meilleure coexistence avec d'autres réseaux sans fil.

2.10.1 IEEE 802.15.4 WPAN

Les principales caractéristiques de cette norme sont la flexibilité du réseau, un faible coût, une très faible consommation d'énergie et un faible débit de données dans un réseau autoorganisé de dispositifs peu coûteux fixes ou mobiles. Le standard IEEE 802.15.4 a été développé pour circuits électroniques à faible consommation énergétique.

2.10.1.1 Composants de WPAN

Un réseau ZigBee est composé de plusieurs dispositifs. Un dispositif peut être un périphérique à fonction complète (Full Function Device (FFD)) ou un périphérique à fonction réduite (Reduced Function Device (RFD)). Un réseau doit comprendre au moins un FFD fonctionnant en tant qu'un nœud coordinateur de (Personal Area Network (PAN)).

Les périphériques FFD sont des nœuds qui implémentent la totalité de la spécification ZigBee alors que les RFD sont des nœuds allégés dans un objectif de faible consommation énergétique et de faible utilisation mémoire.

Les nœuds RFD sont nécessairement des nœuds terminaux du réseau ; un tel nœud n'a pas la possibilité de router un paquet sur le réseau, et il est alimenté par une batterie limitée, alors qu'un nœud FFD sera alimenté par une source énergétiquement non contraignante, et ce nœud va inclure toutes les fonctions de coordination du réseau.

2.10.1.2 Topologies de réseau

La figure 2.7 présente les trois types de topologies prises en charge par ZigBee : en étoile, point-à-point et maillée.

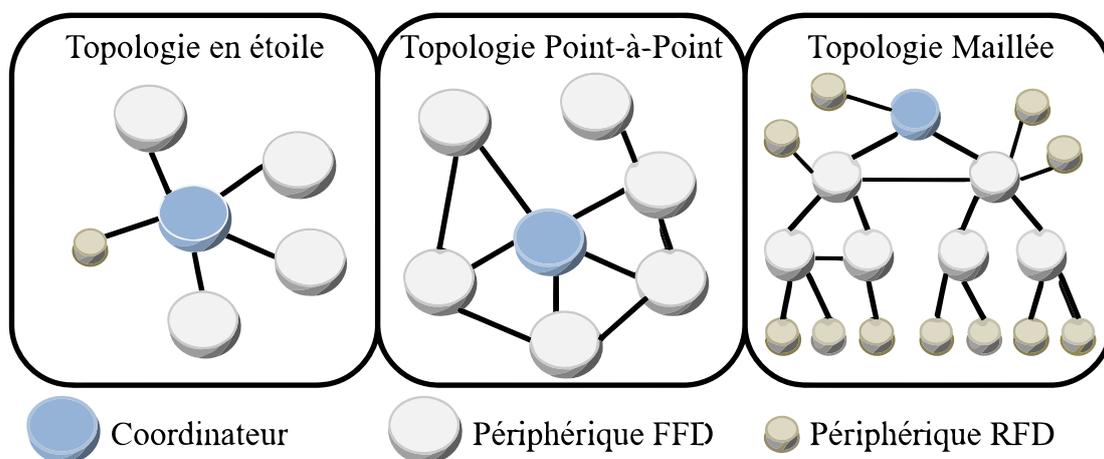


Figure 2.7 – MODÈLES DE TOPOLOGIE

Topologie en étoile : Dans cette topologie, la communication est établie entre les périphériques et un seul nœud contrôleur central, appelé coordinateur de PAN. Le coordinateur de PAN peut être alimenté par le secteur, tandis que les autres nœuds seront probablement alimentés par des batteries. Les applications bénéficiant de cette topologie incluent la domotique, les périphériques pour ordinateurs personnels, les jouets et les jeux. Après la première activation d'un FFD, celui-ci peut établir son propre réseau et devenir le coordinateur de PAN. Chaque réseau en étoile choisit un identifiant de PAN, qui n'est actuellement utilisé par aucun autre réseau de la zone d'influence radio. Cela permet à chaque réseau en étoile de fonctionner indépendamment.

Topologie point-à-point : Dans la topologie point-à-point, il existe également un nœud coordinateur de PAN. Contrairement à la topologie en étoile, n'importe quel périphérique peut communiquer avec n'importe quel autre périphérique tant qu'ils sont à portée l'un de l'autre. Un réseau point-à-point peut être autoorganisé et auto-configuré. Des applications telles que la surveillance industrielle, les réseaux de capteurs sans fil, le suivi des actifs et des stocks bénéficieraient d'une telle topologie. Ce type de topologies permet également une communication multi-sauts pour router les messages d'un périphérique du réseau à un autre. Elle offre aussi une fiabilité par routage à trajets multiples.

Topologie maillée : La topologie maillée est un cas particulier de la topologie point-à-point dans laquelle la plupart des dispositifs sont des FFD. Les RFD jouent le rôle des nœuds feuilles. N'importe lequel des FFD peut agir en tant que coordinateur et fournir des services de synchronisation à d'autres périphériques et coordinateurs. Cependant, un seul de ces coordinateurs est le coordinateur du PAN.

Le coordinateur de PAN forme le premier cluster en s'établissant lui-même en tant que tête de cluster (CLH) avec un identifiant de cluster (Cluster Identifier (CID)) zéro, en choisissant un identifiant de PAN inutilisé et en diffusant des trames de balise aux nœuds voisins. Un nœud candidat recevant une trame de balise peut demander à rejoindre le réseau au niveau du nœud CLH. Si le coordinateur de PAN autorise le nœud à se joindre, il ajoutera ce nouveau nœud en tant que nœud enfant dans sa liste de voisins. Le nœud ayant nouvellement rejoint ajoutera le CLH en tant que parent dans sa liste de voisins et commencera à transmettre des balises périodiques de manière à ce que d'autres périphériques candidats puissent rejoindre le réseau sur ce nœud. Une fois que les exigences de l'application ou du réseau sont satisfaites, le coordinateur du PAN peut demander à un nœud de devenir le CLH d'un nouveau cluster adjacent au premier. L'avantage de la structure en clusters réside dans l'augmentation de la zone de couverture au détriment de la latence accrue des messages.

2.10.2 Architecture des périphériques LR-WPAN

L'architecture des périphériques (Low Rate WPAN (LR-WPAN)) est définie en termes d'un certain nombre de couches. Chaque couche est responsable d'une part de la norme et offre des services aux couches supérieures. La disposition des blocs est basée sur le modèle Open Systems Interconnection (OSI). Les interfaces entre les couches servent à définir les liens logiques qui sont décrits dans cette norme. Un périphérique de LR-WPAN contient un émetteur-récepteur (Radio Frequency (RF)) de radiofréquence avec son mécanisme de commande de bas niveau, et une couche MAC qui permet d'accéder au canal physique pour tous les types de transferts. La figure 2.8 se compose d'une couche réseau, qui fournit la configuration réseau, la manipulation, le routage de message et d'une couche application qui fournit la fonction prévue du dispositif. La définition de ces couches supérieures est en dehors de la portée de cette norme. Un contrôle de liaison logique (Logical Layer Control (LLC)) IEEE 802.2 peut accéder à la sous-couche MAC via la sous-couche de convergence spécifique au service (Service Specific Convergence Sub-

layer (SSCS)).

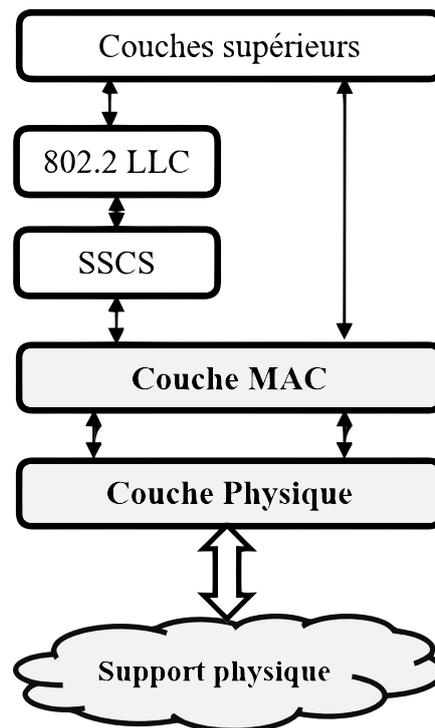


Figure 2.8 – ARCHITECTURE D’UN PÉRIPHÉRIQUE IEEE 802.15.4

2.10.3 La couche physique du standard IEEE 802.15.4

La couche physique (PHY) du standard IEEE 802.15.4 fournit deux services : le service de données PHY et le service de gestion PHY assurant l’interface avec l’entité de gestion de couche physique (Physical Layer Management Entity (PLME)). Le service de données PHY permet la transmission et la réception d’unités de données du protocole PHY (Physical Protocol Data Unit (PPDU)) sur le canal radio physique. Les caractéristiques de la couche physique sont l’activation et la désactivation de l’émetteur-récepteur radio, la détection d’énergie (ED), l’indication de la qualité de liaison (LQI), le choix de canal, l’évaluation de canal libre (CCA) et la transmission ainsi que la réception de paquets sur le support radio.

La norme IEEE 802.15.4 offre deux options basées sur la bande de fréquence. Les deux sont basées sur la modulation de l’étalement de spectre à séquence directe (Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)). Le débit de données est de 250 Kbps sur la bande de fréquence 2.4 GHz, de 40 Kbps sur 915 MHz et de 20 Kbps sur 868 MHz. Un dispositif fonctionnera dans une ou plusieurs bandes de fréquence en utilisant les techniques de modulation et les formats de propagation récapitulés dans le tableau 2.1.

Il existe un seul canal entre 868 et 868,6 MHz, 10 canaux entre 902 et 928 MHz et 16 canaux entre 2.4 et 2.4835 GHz, comme illustré dans la figure 2.9. Plusieurs canaux dans différentes bandes de fréquence permettent la possibilité de se déplacer à l’intérieur du spectre. La norme permet également une sélection dynamique des canaux, une fonction de balayage qui parcourt une liste de canaux pris en charge à la recherche d’une balise, la détection d’énergie du récepteur, de l’indication de la qualité de la liaison et du changement de canal.

La sensibilité du récepteur est de -85 dBm pour 2.4 GHz et de -92 dBm pour 868/915 MHz. La portée d’écoute est fonction de sensibilité du récepteur et la puissance de transmission.

Tableau 2.1 – BANDES DE FRÉQUENCES UTILISÉES PAR LA NORME IEEE 802.15.4

| PHY MHz | Frequency bands (MHz) | Spreading parametres | | Data parametres | | |
|---------|-----------------------|----------------------|------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|
| | | Chip rate (Kchip/s) | Modulation | Bit rate (Kb/s) | Symbol rate (Ksymbol/s) | Symbols |
| 868/915 | 868 - 868.6 | 300 | BPSK | 20 | 20 | Binary |
| | 902 - 928 | 600 | BPSK | 40 | 40 | Binary |
| 2450 | 2400 - 2483.5 | 2000 | O-QPSK | 250 | 62.5 | 16-ary Orthogonale |

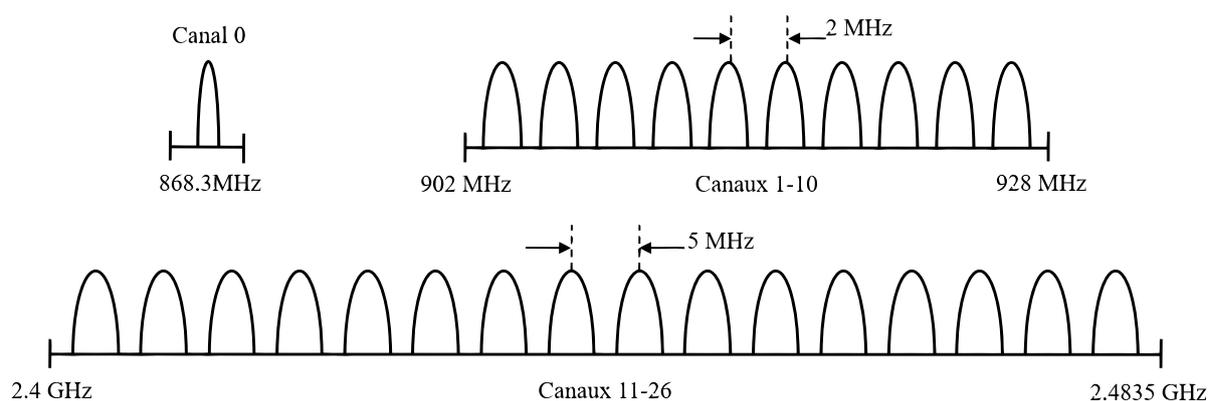


Figure 2.9 – BANDES DE FRÉQUENCES UTILISÉES PAR LA NORME IEEE 802.15.4

La puissance d'émission maximale doit être conforme aux réglementations locales. Le niveau nominal de puissance d'émission d'un appareil conforme doit être indiqué par le paramètre *PhyTransmitPower* de la couche physique.

2.10.3.1 Détection d'énergie du récepteur (ED)

La mesure de la détection d'énergie du récepteur (ED) est destinée à être utilisée par une couche réseau comme partie de l'algorithme de sélection de canal. Il s'agit d'une estimation de la puissance du signal reçu dans la bande passante d'un canal IEEE 802.15.4. La durée ED doit être égale à 8 périodes de symbole.

Le résultat de l'ED doit être rapporté sous la forme d'un entier de 8 bits compris entre 0x00 et 0xff. La valeur ED minimale (0) doit indiquer une puissance reçue inférieure à 10 dB au-dessus de la sensibilité du récepteur spécifié. La plage de puissance reçue couverte par les valeurs ED doit être d'au moins 40 dB. Dans cette plage, le mappage de la puissance reçue en décibels sur les valeurs ED doit être linéaire avec une précision de ± 6 dB.

2.10.3.2 Indication de la qualité de la liaison (LQI)

À la réception d'un paquet, la couche physique envoie la longueur de la (Physical Layer Service Data Unit (PSDU)), la PSDU elle-même et la qualité de la liaison (LQ) dans la primitive d'indication PD-DATA. La mesure LQI est une caractérisation de la force et/ou de la qualité d'un paquet reçu. La mesure peut être mise en œuvre en utilisant le récepteur ED, une évaluation du rapport signal sur bruit ou une combinaison de ces méthodes. Cette mesure sera effectuée

pour chaque paquet reçu, et le résultat sera rapporté à la sous couche MAC inférieure en utilisant *PD-DATA.indication* sous la forme d'un nombre entier compris entre 0x00 à 0xff. Les valeurs minimale et maximale de LQI (0x00 et 0xff) devraient être associées aux valeurs les plus basse et plus haute de la qualité des signaux IEEE 802.15.4 détectables par le récepteur, et les valeurs LQ devraient être uniformément réparties entre ces deux limites.

2.10.3.3 L'évaluation du canal libre (CCA)

La couche physique de la norme IEEE 802.15.4 fournira la possibilité pour exécuter la procédure de l'évaluation du canal libre (CCA) selon au moins l'une des trois méthodes suivantes :

- Energie au-dessus du seuil** : la technique CCA doit signaler un support de transmission occupé lors de la détection de toute énergie supérieure au seuil ED.
- Détection de la porteuse uniquement** : la technique CCA doit signaler un support de transmission occupé uniquement lors de la détection d'un signal représentant les caractéristiques de modulation et d'étalement de la norme IEEE 802.15.4. Ce signal peut être supérieur ou inférieur au seuil ED.
- Détection de porteuse avec de l'énergie au-dessus de seuil** : la technique CCA doit signaler un support de transmission occupé uniquement à la détection d'un signal représentant les caractéristiques de modulation et d'étalement de la norme IEEE 802.15.4 dont l'énergie dépasse le seuil ED.

2.10.3.4 Paquet PPDU

La structure du paquet PPDU est illustrée dans le tableau 2.2. Chaque paquet PPDU comprend les champs de base suivants :

Tableau 2.2 – STRUCTURE DU PAQUET PPDU

| Octets : 4 | 1 | 1 | | Variable |
|------------|-----|--------------------------|---------------------|---------------|
| Preamble | SFD | Frame length (7 bits) | Reserved (1 bit) | PSDU |
| SHR | | PHR | | PHY (payload) |

- HR**, qui permet à un appareil récepteur de se synchroniser et de se verrouiller dans le flux de bits
- PHR**, qui contient des informations sur la longueur de trame
- Les données utiles de longueur variable**, qui porte la trame de la sous-couche MAC.

2.10.4 La couche MAC du standard IEEE 802.15.4

La sous-couche MAC fournit deux services : le service de données MAC et le service de gestion MAC connectant avec le point d'accès au service (Service Access Point (SAP)-MAC Sub-layer Management Entity (MLME)) de la sous-couche MAC. Le service de données MAC permet la transmission et la réception d'unités de données du protocole MAC (MAC Protocol Data Unit (MPDU)) à travers le service de données PHY. Les fonctions de la sous-couche MAC sont : la gestion des balises, l'accès au canal de transmission, la gestion de (Guaranteed Time Slot (GTS)), la validation de trame, la remise de trame avec accusé de réception, l'association

et la dissociation. En outre, la couche inférieure de MAC fournit des crochets pour mettre en application les mécanismes de sécurité appropriés d'application.

2.10.4.1 Structure de la super-trame

La norme IEEE 802.15.4 permet l'utilisation facultative d'une structure de super-trame. Le format de la super-trame est défini par le coordinateur. La super-trame est délimitée par des balises de réseau et est divisée en 16 slots de temps de tailles égales. La trame balise est transmise dans le premier slot de temps de chaque super-trame. Si un coordinateur ne souhaite pas utiliser la structure de super-trame, il peut désactiver les transmissions de balises. Les balises servent à synchroniser les périphériques connectés, à identifier le WPAN et à décrire la configuration des super-frames.

La super-trame peut avoir une partie active et une partie inactive. Pendant la partie inactive, le coordinateur ne doit pas interagir avec ses voisins et peut passer en mode basse consommation. La partie active comprend la période d'accès avec contention (Contention Access Period (CAP)) et la période d'accès sans contention (Contention Free Period (CFP)). Tout dispositif souhaitant communiquer pendant le CAP doit entrer en concurrence avec d'autres dispositifs utilisant le mécanisme CSMA/CA slotté. Par ailleurs, la période CFP contient des Slot de Temps Garantis (GTS). Les GTS apparaissent toujours à la fin de la super-trame active et commencent immédiatement après le slot de temps limite de la période CAP. Le coordinateur de WPAN peut affecter à un nœud jusqu'à sept de ces GTS et un GTS peut occuper plus d'une période.

La durée des différentes parties de la super-trame est calculée par les valeurs de *macBeaconOrder* et *macSuperFrameOrder*. *macBeaconOrder* décrit l'intervalle durant lequel le coordinateur doit transmettre ses trames de balise. L'intervalle de balise, (Beacon Interval (BI)), est lié au *macBeaconOrder*, (Beacon Order (BO)), comme suit : $BI = aBaseSuperFrameDuration \times 2^{BO}$, d'où $0 < BO < 14$. La super-trame est ignorée si $BO = 15$.

La valeur de *macSuperFrameOrder* décrit la longueur de la partie active de la super-trame. La durée de la super-trame, (Super-frame Duration (SD)), est liée à *macSuperFrameOrder*, (Super-frame Order (SO)), comme suit : $SD = aBaseSuperFrameDuration \times 2^{SO}$, d'où $0 < SO < 14$. Si $SO = 15$, la super-trame ne doit pas rester active après la balise.

La partie active de chaque super-trame est divisée en *aNumSuperFrameSlots* Slots de temps et de durée $2^{SO} \times aBaseSlotDuration$ et est composée de trois parties : une balise, une période CAP et une période CFP. La balise est toujours transmise au début du slot de temps 0 sans utilisation de CSMA. La période CAP commence immédiatement après la balise. Le CAP doit comporter au moins un symbole *MinCAPLength*, sauf si un espace supplémentaire est nécessaire pour prendre en charge temporairement l'augmentation de la longueur de la trame de balise. Toutes les trames, à l'exception des trames d'accusé de réception ou de toute trame de données qui suit immédiatement l'accusé de réception d'une commande de demande de données qui sont transmises dans la période CAP, doivent utiliser le mécanisme CSMA/CA slotté pour accéder au canal. Une transmission dans la période CAP doit être complète avant la fin de cette période. Si cela n'est pas possible, la transmission est reportée jusqu'à la période CAP de la prochaine super-trame. Un exemple de structure d'une super-trame est présenté dans la figure 2.10.

La période CFP, si elle est présente, doit commencer immédiatement après le slot de temps limite de la période CAP et s'étend jusqu'à la fin de la partie active de la super-trame. La longueur de la période CFP est déterminée par la longueur totale de tous les slots GTS combinés. Aucune transmission au sein de la CFP ne doit utiliser le mécanisme CSMA/CA. Un nœud émettant dans la période CFP doit s'assurer que ses transmissions sont complètes avant la fin de son GTS.

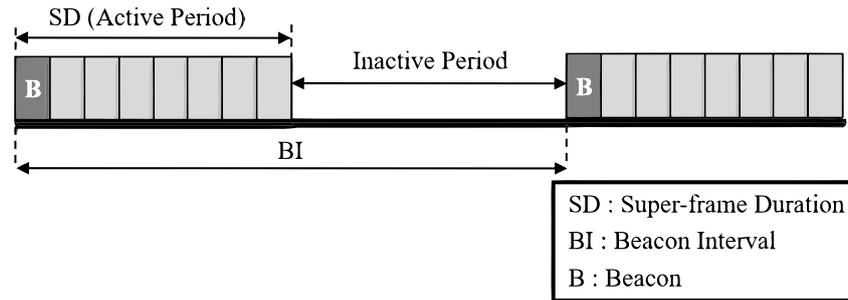


Figure 2.10 – STRUCTURE DE LA SUPER-TRAME IEEE 802.15.4

La durée (Inter Frame Spacing (IFS)) est la durée nécessaire au traitement du paquet reçu par la couche physique. Les trames transmises doivent être suivies d'une période IFS. La longueur de cette période dépend de la taille de la trame qui vient d'être transmise. Les trames d'une longueur maximale à $MaxSSIFSFrameSize$ doivent être suivies d'un Short Inter Frame Space (SIFS), tandis que les trames de plus grande longueur doivent être suivies d'un Long Inter Frame Space (LIFS).

Les réseaux de (Wireless Personal Area Network (WPAN)) qui ne souhaitent pas utiliser la super-trame doivent mettre à la fois $macBeaconOrder$ et $macSuperFrameOrder$ à 15. Dans ce type de réseau, un coordonnateur ne doit transmettre aucune balise; toutes les transmissions, à l'exception de la trame d'accusé de réception, doivent utiliser la technique CSMA/CA non slotté pour accéder à un canal, les GTS ne sont pas autorisés.

2.10.4.2 Algorithme CSMA/CA

Si la structure de la super-trame est utilisée dans le WPAN, la technique CSMA/CA slottée doit être utilisée. Si des balises ne sont pas utilisées dans le WPAN ou si une balise ne peut pas être localisée dans un réseau activé par une balise, un algorithme CSMA/CA non slotté est utilisé. Dans les deux cas, l'algorithme est implémenté en utilisant des unités de temps appelées périodes de backoff, ce qui correspond aux symboles $aUnitBackoffPeriod$.

Dans le mécanisme d'accès au canal CSMA/CA slotté, les limites de la période de backoff de chaque périphérique de réseau WPAN sont alignées sur les limites des slots de temps de super-trame du coordonnateur de WPAN. Dans le mécanisme CSMA/CA slotté, si un périphérique souhaite transmettre des trames de données pendant la période CAP, il doit localiser la limite de la prochaine période de backoff. Par contre, dans CSMA/CA non slotté, il n'est pas nécessaire que les périodes de backoff d'un périphérique soient synchronisées avec les périodes de backoff d'un autre périphérique.

Chaque périphérique a trois variables : (Number of Backoffs (NB)), (Contention Window (CW)) et (Backoff Exponent (BE)). NB indique le nombre de fois où l'algorithme CSMA/CA a été demandé pour effectuer la transmission en cours. Il est initialisé à 0 avant chaque nouvelle transmission. Si cette valeur dépasse la variable $macMaxCSMABackoffs$ (qui est égale à 5 par défaut) l'accès au support de transmission est jugé comme étant un échec. CW est la longueur de la fenêtre de contention, qui définit le nombre de périodes de backoff qui doivent être libres d'activité avant le début de la transmission. Il est initialisé à 2 avant chaque tentative de transmission et réinitialisé à 2 chaque fois que le canal est considéré comme occupé. CW n'est utilisé que pour les CSMA/CA slotté. BE est l'exposant de backoff, qui permet de calculer un nombre aléatoire de périodes de backoff qu'un périphérique doit attendre avant d'essayer d'évaluer le canal avec la procédure CCA. Bien que le récepteur du dispositif soit activé pendant l'exécution

de CCA, le périphérique doit ignorer toutes les trames reçues pendant ce temps.

Dans les CSMA/CA slotté, les variables NB, CW et BE sont initialisés et la limite de la prochaine période de backoff est localisée. Alors que, dans CSMA/CA non slotté, les variables NB et BE sont initialisés (étape 1). La couche MAC doit attendre un nombre aléatoire de périodes de backoff complètes comprises entre $[0 \text{ et } 2^{BE} - 1]$ (étape 2), puis demander à la couche physique d'effectuer une CCA (évaluation du canal libre) (étape 3). La sous-couche MAC doit alors continuer si les étapes restantes de l'algorithme CSMA/CA, la transmission de trame et tout accusé de réception peuvent être terminés avant la fin de la période CAP. Si la sous-couche MAC ne peut pas continuer, elle attend le début de la période CAP dans la prochaine super-trame et répète l'évaluation.

Si le canal est considéré comme occupé (étape 4), la sous-couche MAC doit incrémenter les variables NB et BE, en veillant à ce que BE ne soit pas supérieur à $aMaxBE$. Dans CSMA/CA slotté, CW est également réinitialisé à 2. Si la valeur de NB est inférieure ou égale à $macMaxCSMABackoffs$, la CSMA/CA doit revenir à l'étape 2, sinon la CSMA/CA doit se terminer par un état d'échec d'accès au canal.

Si le canal est considéré comme étant au repos (étape 5), dans CSMA/CA slotté, la sous-couche MAC doit s'assurer que la fenêtre de contention CW est égale à zéro avant de commencer la transmission. Pour cela, la sous-couche MAC commence par décrémenter CW de 1. Si CW n'est pas égal à 0, passez à l'étape 3 sinon commencez la transmission à la limite de la prochaine période de backoff. Dans la CSMA/CA non slotté, la sous-couche MAC commence la transmission immédiatement si le canal est considéré comme étant libre. L'ensemble de l'algorithme CSMA/CA est illustré à la figure 2.10.

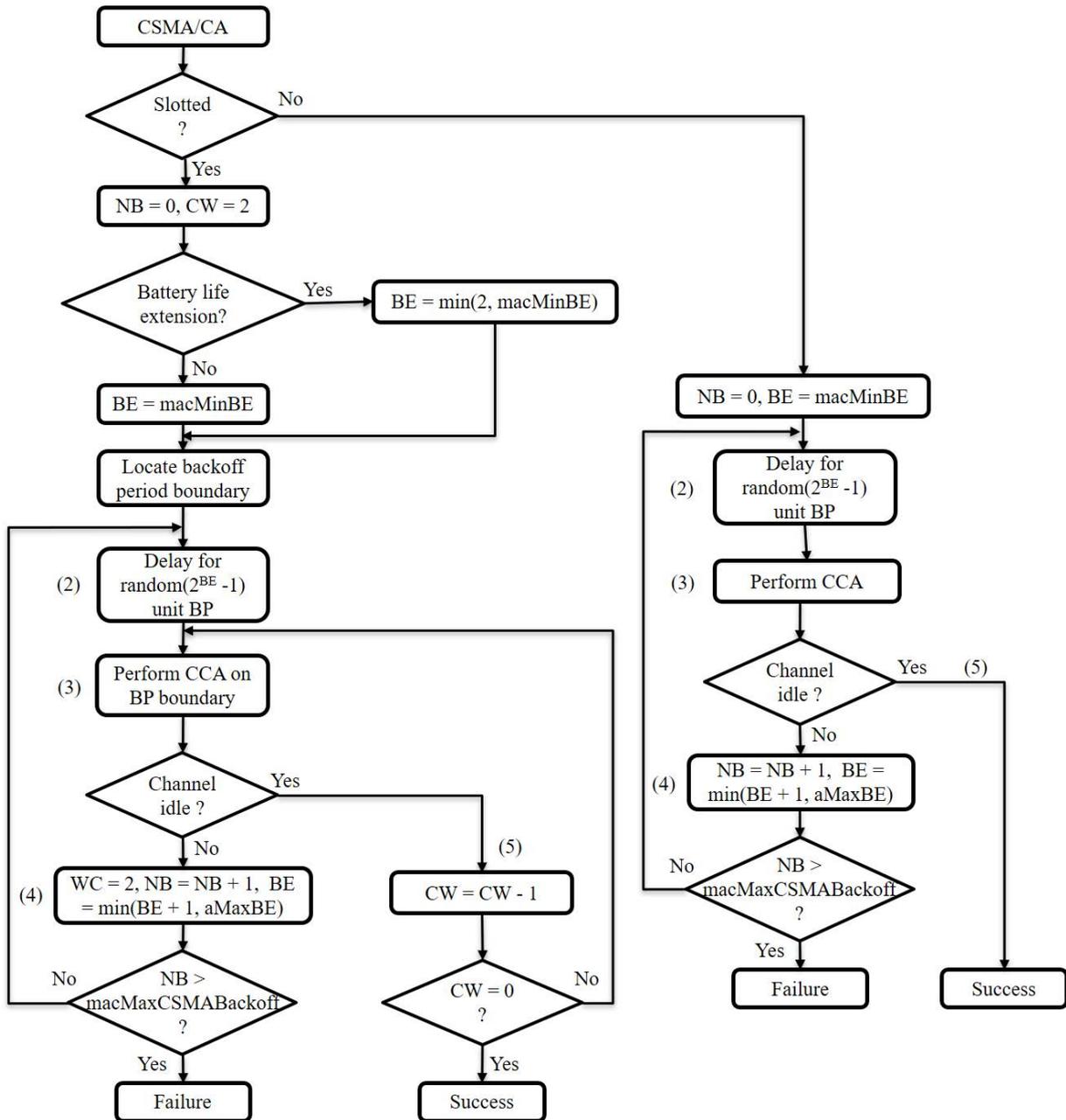


Figure 2.11 – ALGORITHME CSMA/CA

2.10.4.3 Modèles de transfert de données

Il existe trois types de transactions de transfert de données : d'un coordinateur à un périphérique, d'un périphérique à un coordinateur et entre deux périphériques homologues. Le mécanisme de chacun de ces transferts dépend de la prise en charge par le réseau de la transmission des balises. Lorsqu'un périphérique souhaite transférer des données sur un réseau sans balise, il transmet simplement ses trames de données, en utilisant la technique CSMA/CA non slottée, au coordinateur. Il existe également un accusé de réception facultatif à la fin, comme illustré à la figure 2.12.

Lorsqu'un périphérique souhaite transférer des données vers un coordinateur d'un réseau dont la balise est activée, il écoute d'abord la balise. Une fois la balise trouvée, elle se synchronise

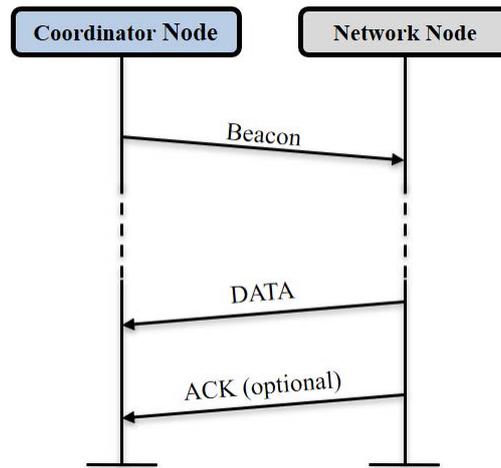


Figure 2.12 – PROCESSUS DE COMMUNICATION AVEC UN COORDINATEUR DANS LE MODE BEACON-ENABLED

sur la structure de la super-trame. Il transmet sa trame de données au coordinateur à l'aide de l'algorithme CSMA/CA slotté. Il y a un accusé de réception facultatif à la fin, comme le montre la figure 2.13.

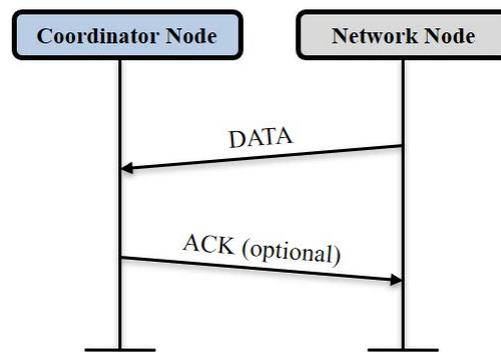


Figure 2.13 – PROCESSUS DE COMMUNICATION AVEC UN COORDINATEUR DANS LE MODE NON BEACON-ENABLED

Les transferts d'applications sont entièrement contrôlés par les périphériques d'un PAN et non par le coordinateur. Ceci fournit la fonctionnalité de conservation de l'énergie du réseau ZigBee. Lorsqu'un coordinateur souhaite transférer des données vers un périphérique d'un réseau activé par une balise, il indique dans la balise que le message de données est en attente. Le périphérique écoute périodiquement la balise réseau et, si un message est en attente, transmet une commande MAC demandant ces données, à l'aide de la CSMA/CA slottée.

Le coordinateur accuse éventuellement la réussite de la transmission de ce paquet. La trame de données en attente est ensuite envoyée en utilisant la technique CSMA/CA slottée. Le périphérique accuse la réussite de la réception des données en transmettant une trame d'accusé de réception. À la réception de l'accusé de réception, le message est supprimé de la liste des messages en attente dans la balise, comme illustré à la figure 2.14.

Lorsqu'un coordinateur souhaite transférer des données vers un périphérique dans un réseau sans balise, il stocke les données pour que le périphérique approprié établisse une connexion et demande des données. Un périphérique peut établir une connexion en transmettant une commande MAC demandant les données, en utilisant la technique CSMA/CA non slottée, à son

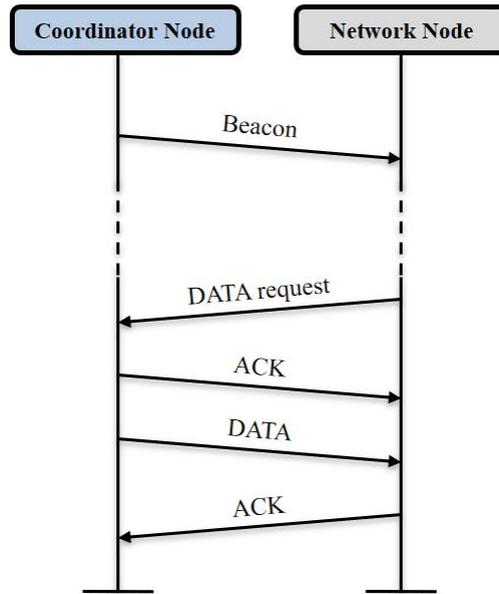


Figure 2.14 – PROCESSUS DE COMMUNICATION D’UN COORDINATEUR DANS LE MODE BEACON-ENABLED

coordonateur à un débit défini par l’application. Le coordonateur reconnaît ce paquet. Si des données sont en attente, le coordonateur transmet la trame de données à l’aide de CSMA/CA non slottée. Si les données ne sont pas en attente, le coordonateur transmet une trame de données avec une charge utile de longueur nulle pour indiquer qu’aucune donnée n’était en attente. Le périphérique accuse la réception de ce paquet, comme illustré à la figure 2.15.

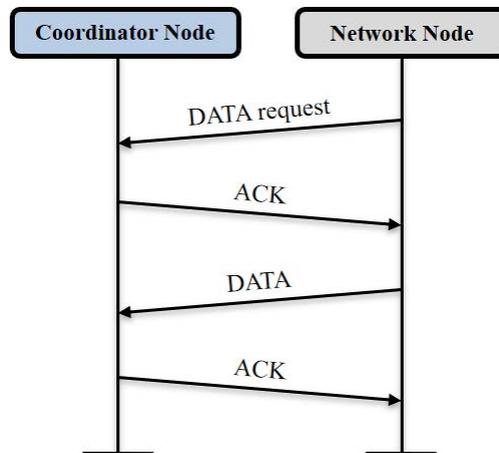


Figure 2.15 – PROCESSUS DE COMMUNICATION D’UN COORDINATEUR DANS LE MODE NON BEACON-ENABLED

Dans un réseau point-à-point, chaque périphérique peut communiquer avec tout autre périphérique situé dans son rayon de transmission. Il y a deux options pour cela. Dans le premier cas, le nœud écoutera en permanence et transmettra ses données à l’aide de CSMA/CA non slottée. Dans le second cas, les nœuds se synchronisent entre eux afin d’économiser de l’énergie.

2.10.5 Limitations identifiées dans IEEE 802.15.4

La norme IEEE 802.15.4 fournit une sous-couche MAC très flexible pouvant être adaptée à divers types d'applications. Pour les applications avec des exigences en termes de temps d'accès, la norme propose l'utilisation de GTS. GTS est un mécanisme d'accès au support basé sur la technique TDMA et qui fournit : une utilisation déterministe du canal pendant une durée prédéterminée pour le nœud propriétaire. Cependant, ce mécanisme a un ensemble de limites qui contribuent à la dégradation de la qualité de service, mais il ne satisfait pas non plus le compromis entre le délai et l'énergie. Ces limitations peuvent être résumées dans ce qui suit.

- Premièrement, dans le mode coordonné de la norme IEEE 802.15.4, la durée active de la super-trame est composée de deux périodes d'accès au support ; CAP et CFP. Au cours de la première période, tous les nœuds ont accès au support à l'aide de l'algorithme CSMA/CA slotté. Cependant, lors de la seconde période, le coordinateur garantit aux périphériques un nombre défini de slots de temps pour un accès libre au support. La période CFP a pour but de garantir des slots de temps pour les nœuds ayant un trafic en temps réel. Pour assurer le GTS aux nœuds, il doit être précédé d'une demande d'allocation au coordinateur, pendant la période du CAP. Ce processus n'est pas toujours évident, car pendant la période du CAP, les nœuds tentent d'accéder au support en utilisant le CSMA/CA slotté, qui ne prend pas en compte l'urgence du message envoyé ni la priorité du nœud. Il n'est donc pas certain que le nœud ayant les messages de priorité plus élevée obtiendra l'accès au support afin d'envoyer sa demande d'allocation. De plus, conformément à la super-trame de la norme IEEE 802.15.4, le CFP est précédé de la période CAP. Cela signifie que les paquets en temps non réel seront transmis avant et plus rapidement que les paquets en temps critique. Le résultat de ce problème est encore pire lorsque la taille de la période active augmente parallèlement à celle de la période de la CAP, et donc que le temps d'attente sera plus important.
- Deuxièmement, pour surmonter la première limitation, la norme permet aux nœuds propriétaires du GTS d'entrer en compétition avec les autres nœuds dans la période du CAP. Cependant, cette solution souffre de plusieurs restrictions : premièrement, l'envoi des données dans la période CAP n'est pas garanti, en particulier dans le cas où la densité du réseau est importante. Deuxièmement, lorsque les données sont envoyées avec succès au cours de la période du CAP, le GTS réservé ne sera pas utilisé, ce qui entraînera un gaspillage de la bande passante.
- La troisième limitation concerne la politique de transmission pendant la période de la CFP. Pendant cette période, seuls les propriétaires de GTS et le coordinateur (chargé en transmettant les données reçues dans la super-trame suivante) doivent rester actifs pendant la durée des GTS. Trois observations peuvent être tirées de ce processus :
 - Après la réception des données, le coordinateur les stocke dans une mémoire tampon pour le reste de la SD. Cela signifie que le délai de transmission sera relatif à la taille de la super-trame pouvant être longue dans certaines applications de RCSF.
 - Lorsque le coordinateur souhaite transférer les données reçues, il utilise la méthode d'accès CSMA/CA. Et cette dernière ne garantit pas que les données soient envoyées sans collision et sans un retard, ce qui peut introduire un délai supplémentaire.
 - Au niveau du coordinateur, aucune politique ne gère la priorité de transmission des paquets reçus, ce qui peut également retarder la transmission des paquets prioritaires.

2.11 Conclusion

La principale raison de la dissipation d'énergie dans les réseaux RCSF est due à l'écoute passive lorsqu'un nœud exécute un balayage du canal sans réception de trame. Pour surmonter ce problème, les chercheurs ont proposé de mettre l'émetteur-récepteur en mode veille de temps à autre. Pendant les périodes actives, les nœuds échangent des données pour communiquer tandis que, pendant les périodes de sommeil, l'émetteur-récepteur est désactivé. La période du mode veille dépend de la politique adoptée par le protocole de la couche MAC.

La conception complexe de ces protocoles consistait à coordonner la période active entre le nœud émetteur et le nœud récepteur, afin qu'ils puissent communiquer et revenir en mode veille. Les solutions existantes sont classées en quatre catégories : les protocoles MAC basés sur la planification, les protocoles MAC basés sur la contention, les protocoles MAC basés sur l'échantillonnage du préambule et les protocoles MAC hybrides.

Dans ce chapitre, dans un premier temps, nous avons brièvement décrit les principaux protocoles MAC basés sur la planification, en analysant leurs forces et leurs inconvénients. Ce type de protocoles MAC est principalement caractérisé par l'évitement des collisions, ce qui le rend plus adapté aux réseaux de petite taille. Cependant, il est plus enclin à gaspiller la bande passante lorsque les ressources allouées dépassent les besoins des nœuds. A cet égard, nos contributions sont basées sur le standard IEEE 802.15.4 et présentées dans les chapitres suivants (voir les chapitres 4 et 5).

L'OPTIMISATION DE L'ÉNERGIE BASÉE SUR DES MÉCANISMES DE PRÉDICTION DE TRAFICS

Sommaire

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Introduction | 43 |
| 3.2 | Environnement de simulation | 44 |
| 3.2.1 | Mesures de performance | 44 |
| 3.2.2 | Simulateur NS-2 | 45 |
| 3.3 | Filtre de Kalman pour l'optimisation de l'énergie dans les RCSF | 45 |
| 3.3.1 | Travaux connexes | 45 |
| 3.3.2 | Modélisation de réseau et principes de conception du protocole KF-MAC | 47 |
| 3.3.3 | Processus de fonctionnement du protocole KF-MAC | 50 |
| 3.3.4 | Paramètres de simulation | 51 |
| 3.3.5 | Résultats de la simulation | 52 |
| 3.4 | Cycle de fonctionnement adapté pour l'optimisation de l'énergie dans les RCSF | 56 |
| 3.4.1 | Travaux connexes | 56 |
| 3.4.2 | Le mode de fonctionnement du protocole AD-MAC | 57 |
| 3.4.3 | Simulation du protocole AD-MAC | 60 |
| 3.5 | Conclusion | 63 |

3.1 Introduction

Dans un RCSF, la couche MAC est responsable de deux tâches principales ; gérer les modes de l'émetteur-récepteur des nœuds capteurs et contrôler l'accès au support de transmission. Dans ce chapitre, nous allons traiter la première tâche de cette couche. Nous avons essayé de gérer et de contrôler les modes d'activité de l'émetteur-récepteur de manière à s'adapter au trafic de réseau. Tout en assurant une faible latence et une faible consommation d'énergie. Pour résoudre ces problèmes difficiles, nous avons proposé deux nouveaux protocoles de communication pour les RCSF basés sur le standard IEEE 802.15.4 qui sont le protocole (KF-MAC) et le protocole (AD-MAC), ces deux protocoles représentent une bonne solution pour les RCSF conçus pour maximiser l'efficacité de la consommation d'énergie des nœuds capteurs dans un réseau caractérisé par un flux de données événementiel ou périodique. Les fonctionnalités des protocoles KF-MAC et AD-MAC visent principalement à assurer une transmission fiable tout en optimisant l'intervalle de sommeil des nœuds entre les réveils consécutifs. Un nœud de capteur ne doit être réveillé que s'il doit recevoir ou transmettre des données sans entraîner de surcoût inutile ou de coût d'écoute passive. En d'autres termes, KF-MAC et AD-MAC adaptent le comportement de l'émetteur-récepteur des nœuds capteur au trafic généré dans un environnement événementiel ou périodique. Plus important encore, KF-MAC et AD-MAC utilisent un mécanisme de retransmission basé sur le report qui permet de résoudre efficacement le problème des collisions.

Pour valider les protocoles KF-MAC et AD-MAC, nous comparons leurs performances à certains protocoles MAC écoénergétiques existants, tels que le protocole (Sensor MAC (S-MAC)) et la norme IEEE 802.15.4. Les résultats de la simulation montrent que KF-MAC et AD-MAC obtiennent de meilleures performances en termes d'efficacité énergétique et de taux de paquets délivrés (Packet Delivery Ratio (PDR)), sans affecter négativement le temps de latence.

La suite de ce chapitre est organisée comme suit. Nous définissons l'environnement de simulation ainsi que les métriques de performances utilisées pour valider nos contributions dans la section 3.1. Ensuite, le mode de fonctionnement du protocole KF-MAC ainsi ses résultats obtenus sont présentés dans la section 3.2. Alors que dans la section 3.3 nous présentons le mode de fonctionnement et les résultats de simulation du protocole AD-MAC. Les conclusions sont présentées dans la section 3.4.

3.2 Environnement de simulation

Dans cette section, nous définissons d'abord les mesures utilisées pour évaluer notre protocole. Ensuite, nous présentons un bref aperçu du simulateur sur lequel nous avons implémenté nos simulations. Enfin, nous résumons les paramètres de simulation de toutes les expériences rapportées dans la section suivante (section 3.4).

3.2.1 Mesures de performance

Les critères de performance que nous utilisons pour évaluer nos contributions sont le temps de latence, le taux des paquets délivrés et la consommation d'énergie.

Consommation d'énergie : la limitation des ressources énergétiques dans le RCSF peut entraîner une courte durée de vie. La gestion de l'énergie est donc cruciale dans ces réseaux. Nous avons discuté précédemment de nombreuses sources de consommation d'énergie et chaque protocole de communication doit traiter ces sources afin de prolonger la durée de vie du réseau. L'objectif principal du protocole MAC conçu pour les RCSF est de minimiser la consommation d'énergie de l'émetteur-récepteur des nœuds capteurs. Pour évaluer nos contributions, nous devons donc tenir compte de la manière dont ils traitent le problème de la dissipation d'énergie.

Latence de transmission (délai de bout en bout) : il s'agit d'un paramètre important, car la plupart des applications de RCSF nécessitent une communication rapide. Ces exigences dépendent de l'application et parfois du type des messages envoyés. En général, deux sources entraînent une latence élevée. Premièrement, le délai d'accès au support qui dépend fortement de la densité du réseau. Ce problème peut être contrôlé dans le cas de méthodes d'accès déterministes. La seconde provient du temps de traitement des paquets dans les nœuds intermédiaires, en particulier dans les files d'attente. En outre, la latence dépend de la charge de trafic et des mécanismes de gestion des files d'attente utilisés.

Taux des paquets délivrés (PDR) : ce paramètre est défini comme un rapport entre les paquets de données bien reçus par les nœuds destinations et ceux générés par tous les nœuds sources. Mathématiquement, cela peut être défini comme :

$$PDR = \frac{S_1}{S_2} \quad (3.1)$$

Où, S_1 est la somme des paquets de données bien reçus par les destinations et S_2 est la somme des paquets de données générés par tous les sources.

3.2.2 Simulateur NS-2

Toutes nos simulations sont effectuées à l'aide du simulateur (Network Simulator 2 (NS-2)). Par conséquent, avant de traiter les résultats de simulation, nous allons d'abord présenter ce simulateur et ses caractéristiques.

NS-2 [93] est un simulateur d'événements discrets conçu pour simuler les réseaux et leurs protocoles de communication. Il prend en charge une grande diversité de protocoles dans toutes les couches (application, réseau, transport, couche MAC et physique). En outre, il fournit un cadre de base pour simuler différents types de réseaux ; filaire ou sans fil (LAN, WLAN, WPAN, etc.). Comme il s'agit d'un logiciel open source, l'utilisateur peut modifier les paramètres de différentes couches, créer son application et même développer un nouveau protocole. En outre, il fournit une documentation en ligne qui rend son utilisation plus pratique. Pour ces raisons, il est considéré comme un outil très attirant pour les chercheurs.

Le projet NS a été lancé en 1989 comme étant un simulateur de réseau réel. Comme la plupart des projets open source, il a considérablement évolué ces dernières années grâce à la contribution des utilisateurs et des programmeurs. Récemment, il a fini par se faire une référence pour simuler les réseaux. La principale différence entre ce logiciel et ses concurrents (OPNET [94], Qualnet [95]) est qu'il est complètement open source et gratuit. En outre, il est soutenu par de grands acteurs de la recherche scientifique, à savoir DARPA, Sun, Xerox, UCB et le CNRS français. Les utilisateurs peuvent exécuter ce simulateur sous Linux ou Cygwin. NS-2 est écrit en C++ avec un interpréteur (Object Tool Command Language (OTCL)).

OTCL est une variante orientée objet du langage de script bien connu (Tool Command Language (TCL)) [96]. C++ crée le cœur du simulateur, tandis que OTCL est utilisé pour générer des scénarios de simulation et pour manipuler des objets C++ existants. Le projet NS comprend également une interface graphique appelée NAM (Network Animator) qui permet une exploitation visuelle des résultats de la simulation.

3.3 Filtre de Kalman pour l'optimisation de l'énergie dans les RCSF

3.3.1 Travaux connexes

Aujourd'hui, les RCSF sont de plus en plus utilisés dans de nombreux domaines d'application. Ainsi, plusieurs travaux de recherches ont été proposés pour améliorer leurs fonctionnalités. Les nœuds de capteurs étant de petits dispositifs qui ne disposent que de ressources énergétiques très limitées, la conception du protocole MAC est devenue un domaine de recherche très actif et intéressant ces dernières années. L'objectif principal des protocoles MAC pour les RCSF est de réduire la consommation d'énergie en minimisant l'effet des sources de dissipation d'énergie.

Plusieurs travaux effectués au niveau de la couche MAC ont traité la problématique de l'efficacité énergétique du réseau. Le protocole A-MAC, proposé par Dutta et al. [97], prend en charge les communications de diffusion, monodiffusion et multidiffusion, ainsi que les services de réveil sous une architecture unifiée. Le protocole (Synchronous Receiver Initiated (SRI-MAC)) proposé par Boulfekhar et al. [98], est basé sur le fonctionnement du protocole MAC à duty-cycle synchronisé, qui utilise une balise adaptative et des paquets (RTS/CTS) afin de minimiser l'écoute passive et de réduire le duty-cycle. Dong et al. [99] ont conçu un protocole MAC asynchrone appelé (Prediction-Based Asynchronous MAC (PBA-MAC)) basé sur la prévision de la charge de trafic dans les RCSF. Ce protocole applique un mécanisme de réveil pour économiser l'énergie des nœuds de capteur. Ce mécanisme permet aux nœuds de capteurs de réduire les coûts de communication en permettant au nœud émetteur de prévoir le temps de réveil du nœud de

destination, sans entraîner de surcoût inutile ni de coût d'écoute passive. En outre, son processus de retransmission basé sur le backcast peut résoudre efficacement les collisions sans fil causées par le conflit des flux de trafic simultanés. Tang et al. ont proposé le protocole (Predictive-Wakeup (PW-MAC)) [100]. PW-MAC utilise une méthode de prévision pour estimer le moment de réveil des nœuds cibles, de sorte qu'un nœud émetteur doit se réveiller avant le destinataire. Peng et al. ont proposé le protocole Cy-MAC [101], qui ajuste de manière dynamique le duty-cycle du nœud du réseau en fonction des conditions de trafic variables en planifiant les moments de rendez-vous entre les voisins. Qiu et al. ont proposé un protocole de diffusion à un seul saut appelé RWB [102], ce protocole prédit le moment de réveil des nœuds et coupe les paquets de diffusion en plusieurs paquets unicast dans l'objectif de réduire la consommation d'énergie. Tang et al. ont conçu le protocole HKMAC[103], ce protocole offre une faible latence de livraison des paquets et une grande économie d'énergie en utilisant le trafic en rafale en ajustant le moment de la balise du récepteur et en programmant les moments d'écoute des nœuds émetteurs pendant la période planifiée. Le protocole (Multi-Layer MAC (ML-MAC)) éco-énergétique pour les RCSF est proposé par JHA et al. [104]. Ce protocole utilise un duty-cycle faible pour réduire l'énergie nécessaire à une communication, ainsi qu'il réduit les collisions dans les cas où deux nœuds ou plus tentent d'envoyer des données simultanément. Le protocole (Weather Adaptive MAC (WA-MAC)) est proposé par Tian et al. [105], WA-MAC permet d'ajuster le processus de transmission de données pour éviter la perte de paquets et établit un temps de rendez-vous approprié entre les nœuds émetteurs et les récepteurs afin de réduire la consommation d'énergie des capteurs lors de la transmission de données. Ramadan et al. ont proposé un protocole MAC basé sur la puissance de nœud avec une période d'écoute adaptative [106]. Pour maximiser l'efficacité énergétique, ce protocole introduit une certaine latence des messages afin de réduire le duo de pertes d'énergie associé à l'écoute passive. Zhao et al. ont proposé un protocole MAC simple [107], qui permet un accès sans collision. Dans ce protocole, chaque émetteur doit ajuster son prochain temps de transmission. Renato et al. ont proposé (Receiver-Initiated Multi-Channel MAC (RITMC)) [108] initié par un récepteur multi-canal asynchrone pour le RCSF de faible puissance. Grâce à ce protocole, les auteurs tentent de limiter les effets de l'écoute passive et du confinement des messages en utilisant un mécanisme de reconnaissance (Hello Acquitement (HA)) proposé par le protocole A-MAC, le mécanisme multi-canal permet au nœud d'utiliser sa connaissance préalable du meilleur canal du voisin pour communiquer avec lui. Afin d'évaluer l'importance de la qualité de service dans un protocole MAC pour les RCSF, Subramanian et al. ont proposé un nouveau protocole MAC appelé (PRiority in Node (PRIN)) [109]. Ce protocole utilise trois niveaux de priorité pour hiérarchiser le trafic. Pour chacun de ces niveaux de priorité, des files d'attente de priorités sont définies pour différentes classes de trafic. Les données de priorité la plus élevée sont servies par le nœud. Sakya et al. ont conçu le protocole (Mission-Critical MAC (MC-MAC)) [110] qui utilise l'approche de duty-cycle adaptatif basée sur la régression. Dans ce protocole, le duty-cycle est donné par le modèle de régression du trafic tout en prenant en compte les performances du protocole S-MAC comme le taux des paquets délivrés, le débit et l'énergie résiduelle. Sundararaj et al. ont proposé un protocole MAC hybride de planification dynamique à efficacité énergétique nommé (Energy Efficient Dynamic Scheduling MAC (EDS-MAC)) [111]. Ce protocole fonctionne en deux étapes. Dans la première phase, les auteurs ont mis l'algorithme (Variable Step Size Firefly Algorithm (VSSFFA)) permettant de générer des clusters éco-énergétiques en sélectionnant de manière optimale les chefs de clusters. La méthode VSSFFA permet de réduire le coût de localisation des nœuds CH. Dans la deuxième phase de la "transmission de données", les auteurs cherchent à réduire la latence en permettant un fonctionnement à duty-cycle inférieur. Swain et al. ont proposé un protocole MAC multi-canal économe en énergie appelé (Advertisement Based Multi-channel Distributed MAC (Adv-MMAC)) [112], ce protocole permet aux nœuds de basculer de manière dynamique leurs interfaces radio entre les canaux. Le protocole proposé comprend deux étapes. Au cours de la première étape, les

nœuds qui possèdent des données essaient de tester le canal pour transmettre le paquet ADV. Après avoir reçu l'accusé de réception du destinataire, les nœuds basculent sur le canal libre disponible pour transmettre le paquet de données. Khalil et al. ont proposé une amélioration du protocole (Receiver-Initiated Asynchronous Duty Cycle MAC (RI-MAC)) appelé (Dual Channel Receiver Initiated MAC (DURI-MAC)) [113]. Ce protocole utilise un double canal afin de réduire le nombre de nœuds cachés et exposés afin de minimiser le nombre de collisions. En outre, il utilise un générateur de temps CCA unique qui améliore également le débit du réseau. Al-Sulaifanie et al. ont proposé un protocole MAC nommé (an Adaptive Hierarchical MAC (AH-MAC)) [114] avec optimisation inter-couche pour les réseaux à faible débit. L'objectif principal de ce protocole est de combiner les points forts du protocole (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)) et de la norme IEEE 802.15.4 tout en compensant leurs faiblesses. Les nœuds coordinateurs sont prédéterminés et équipés d'un circuit de récupération d'énergie, tandis que les nœuds normaux sont alimentés par batterie. Pour prolonger la durée de vie opérationnelle du réseau, le protocole AH-MAC transfère la plupart des activités du réseau aux nœuds coordinateurs tout en réduisant l'activité du nœud.

3.3.2 Modélisation de réseau et principes de conception du protocole KF-MAC

Il existe dans la littérature de nombreux filtres de prédiction, qui sont devenus des outils essentiels de la science moderne. Ils effectuent la prédiction d'état et l'estimation de paramètres dans plusieurs domaines, tels que la robotique, la vision par ordinateur et les communications réseau, etc. Lorsque nous étudions et résolvons un problème, nous avons d'abord besoin de formules mathématiques appropriées pour trouver les paramètres essentiels qui décrivent le mieux notre système et la modélisation de leur comportement au fil du temps. Généralement, les filtres prédictifs estiment l'état optimal d'un système. Premièrement, ils utilisent le modèle mathématique de la dynamique du système pour propager les valeurs et les incertitudes de l'état. Ensuite, ils combinent cette estimation préliminaire et la meilleure valeur qui peut être tirée de l'observation.

Il existe plusieurs filtres prédictifs, chacun correspond à un type différent de représentation d'incertitude et de modélisation dynamique. Dans cette solution, nous concentrons notre étude sur le filtre de Kalman; ce filtre représente les incertitudes sous forme de variables aléatoires gaussiennes, entièrement décrites par une moyenne et une matrice de covariance, et modélise le système avec une dynamique et des observations linéaires. Les gaussiennes sont préservées sous des transformations linéaires. La force du filtre de Kalman réside dans sa capacité à prédire les paramètres et à corriger les erreurs, non seulement des capteurs, mais également du modèle lui-même. En effet, pour appliquer le filtre de Kalman, nous devons d'abord modéliser le système pour lequel nous voulons estimer les paramètres de manière linéaire. Dans les méthodes classiques d'estimation (par exemple, la méthode des moindres carrés), une simple erreur dans la modélisation du système entraîne inévitablement une erreur dans l'estimation. La force du filtre de Kalman consiste à intégrer un terme d'imprécision dans le modèle lui-même, ce qui lui permet de donner des estimations correctes malgré les erreurs de modélisation. C'est pour toutes ces raisons que nous avons choisi le filtre de Kalman indépendamment de sa simplicité de mise en œuvre.

Nous considérons que le nœud de coordination a une source d'énergie illimitée et diffuse périodiquement des trames de balises. De ce fait, nous ne devrions pas nous inquiéter de sa consommation d'énergie. Les autres nœuds capteurs ont leurs propres configurations de la période de super-trame (SD), qui est mise à jour à chaque super-trame conformément au processus de filtre de Kalman. Dans la figure 3.2, nous expliquons comment la configuration SD des nœuds est mise à jour.

Au début, tous les slots de temps de la partie SD sont activés. Conserver le premier slot de temps à l'état actif permet aux nœuds capteurs de se réveiller et de recevoir la trame de balise afin de se synchroniser. Un exemple illustratif est représenté sur la figure 3.1. Dans cet exemple, le réseau est composé de trois nœuds capteurs et d'un nœud coordinateur. Notez que l'analyse qui suit est générale et peut être appliquée à un nombre quelconque de nœuds dans le réseau. Dans ce scénario, le nœud coordinateur est toujours en mode actif et diffuse périodiquement des trames de balises. Ainsi, chaque nœud stocke les instants où il a reçu des données dans la super-trame précédente. L'architecture de réseau proposée est la suivante :

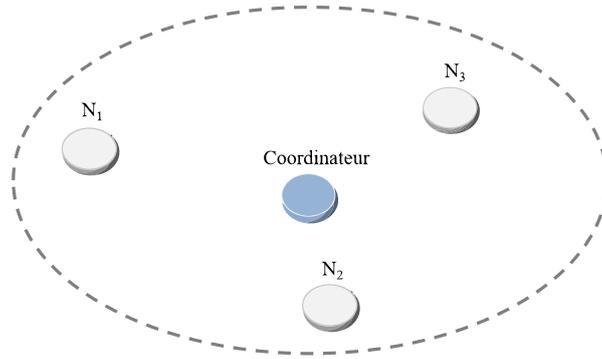


Figure 3.1 – TOPOLOGIE DE L'EXEMPLE PROPOSÉ

Initialement, tous les nœuds activent tous les slots de temps de la partie active de la première super-trame. En supposant que le nœud N_2 a reçu un paquet de données du nœud N_1 à l'instant T_1 et un autre paquet de données à partir de N_3 à l'instant T_2 . Dans ce cas, N_2 enregistre ces deux moments. Ensuite, il applique le filtre de Kalman pour estimer les prochains moments où il devrait se réveiller pour recevoir probablement des données. Les moments estimés sont ajustés pour se situer dans l'intervalle $[0, 2^{SO} \times 15.36ms]$ où SO est un paramètre utilisé pour fixer la durée active (SD) d'une super-trame.

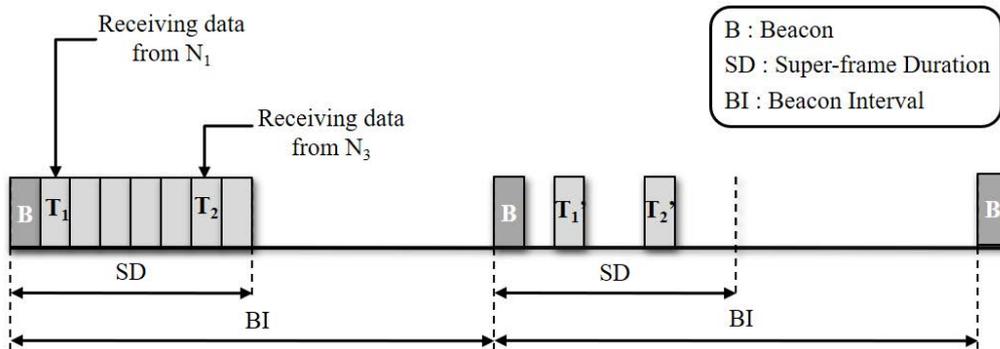
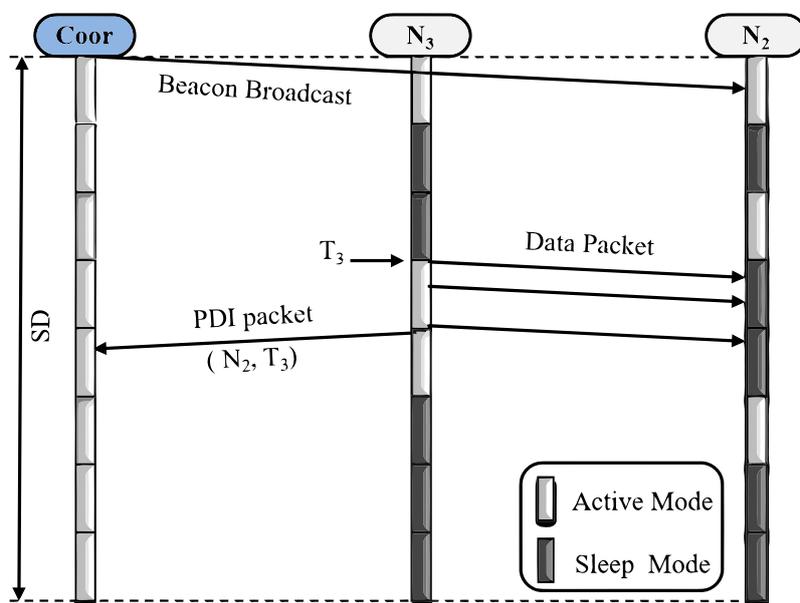


Figure 3.2 – CONFIGURATION DE LA SUPER-TRAME DE NŒUD N_2

Dans la figure 3.3, on suppose que le nœud N_3 veut transmettre des données à l'instant T_3 à N_2 . Malheureusement, ce dernier est actuellement en mode endormi car son filtre de Kalman ne permettait pas de prédire ce nouvel événement. Normalement, la norme IEEE 802.15.4 considère un nœud inaccessible si celui-ci ne peut pas recevoir de données après quatre tentatives de transmission. Ensuite, le nœud émetteur supprime ce paquet et abandonne cette communication. En conséquence, nous perdons des données qui peuvent être sensibles. Alors que dans KF-MAC, le nœud N_2 peut être simplement en mode endormi à cause des calculs du filtre de Kalman. Pour résoudre ce problème, nous avons développé un nouveau mécanisme de retransmission basé sur le report, dans lequel nous forçons le nœud émetteur (N_3) à informer le nœud coordinateur (lorsque

le nœud récepteur (N_2) est toujours inaccessible après la troisième tentative de transmission) via un nouveau paquet de contrôle appelé (Postponed Data Information (PDI)). Le paquet PDI est construit comme indiqué dans le tableau 3.3. Un paquet PDI contient l'ID de nœud récepteur (N_2) et l'instant de la première tentative de transmission lorsque N_3 voulait envoyer des données à N_2 . Concernant la quatrième et dernière tentative, le nœud N_3 la reporte à la prochaine super-trame.

Figure 3.3 – SUPER-TRAME DE NŒUD N_2

L'ordre des champs du paquet PDI doit respecter l'ordre des trames MAC général [74] (voir tableau 3.3). L'entête MHR du PDI contient uniquement le champ de contrôle de trame et le champ de numéro de séquence. Dans le champ "Contrôle" de trame, le sous-champ "type" de la trame contient une valeur différente de celles utilisées par la commande MAC, l'accusé de réception, la balise et les données. Nous utilisons la valeur 7 pour indiquer un paquet PDI. Le champ numéro de séquence contient la même valeur que le numéro de séquence de la trame de données. La charge utile MAC d'un paquet PDI comprend deux champs : le premier champ contient l'ID de nœud concerné par la réception, tandis que le deuxième champ contient l'instant où la première tentative de transmission a eu lieu. Le MFR est composé d'un FCS codé sur 16 bits.

Tableau 3.1 – FORMAT DU PAQUET PDI

| Octets : 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
|------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|---------------------------|
| Frame Control | Sequence Number | Concerned Node ID | Instant of the First attempt | FCS (Frame Chek Sequence) |
| MHR (MAC Header) | | MAC Payload | | MFR (MAC Footer) |

Lorsque le nœud coordinateur reçoit le paquet PDI, il extrait les deux informations (le ID N_2 et l'instant de la première tentative de transmission T_3) et les insère dans de nouveaux champs de la prochaine trame balise. Tous les nœuds capteurs écoutent la trame balise. Dans cet exemple, seul le nœud N_2 a un ID égal à L'ID du nœud inséré dans le champ étendu de la trame balise

est concerné d'extraire et de stocker l'instant T_3 afin de l'inclure dans le prochain calcul de son filtre de Kalman.

3.3.3 Processus de fonctionnement du protocole KF-MAC

Dans cette solution, nous proposons un nouveau protocole MAC éco-énergétique pour contrôler de manière dynamique les moments de réveil des nœuds capteurs durant lesquels ils ont probablement des données à recevoir. De ce fait, le protocole KF-MAC consiste à adapter l'état actif des émetteurs-récepteurs aux flux de trafic à l'aide du filtre de Kalman.

Pour estimer les moments où les nœuds doivent se réveiller, KF-MAC prend les moments de réception des données dans la super-trame précédente comme étant des mesures. Cependant, dans les applications réelles des RCSF, il existe toujours un facteur de bruit appelé bruit gaussien qui peut perturber nos mesures. Pour cela, notre processus est décrit par l'équation de différence linéaire suivante :

$$x_{k+1} = A \times x_k + V_k(\text{Etat estimé}) \quad (3.2)$$

D'où x_{k+1} est le vecteur d'état du processus à l'étape $k + 1$, A est la matrice de transition d'état de l'étape k à l'étape $k + 1$, x_k est le vecteur de processus à l'étape k et V_k est un vecteur supposé être une séquence blanche avec une structure de covariance connue (le bruit d'état). L'observation/mesure du processus étudié est supposée se produire à un moment discret conformément à :

$$z_k = B \times x_k + W_k(\text{Estimation de covariance}) \quad (3.3)$$

z_k est la valeur mesurée du système et se rapporte à la valeur calculée x_k . Dans un cas parfait, $z_k = x_k$, B est une matrice d'identité, elle relie l'état à la mesure z_k et W_k est le vecteur d'erreur de mesure (le bruit d'observation). Dans notre cas, z_k correspond au moment où le nœud a reçu un paquet de données.

Durant le fonctionnement, l'état de notre système est toujours le même, donc $A = 1$. Notre facteur de mesure du bruit est directement pris en compte dans la valeur mesurée du système, donc $B = 1$. (Notez que nous avons supprimé l'indice k à plusieurs endroits car les paramètres respectifs restent constants dans notre modèle). Ainsi, nos équations (3.2) et (3.3) deviennent les suivantes :

$$x_{k+1} = x_k + V_k \quad (3.4)$$

$$z_k = x_k + W_k \quad (3.5)$$

Le filtre de Kalman fonctionne en deux étapes distinctes [115] : Etape de prédiction, dans laquelle nous utilisons l'état estimé du précédent slot de temps actif pour produire une estimation de l'état actuel. Initialement, pour calculer l'estimation optimale, nous calculons d'abord le poids ' K_k ' :

$$K_k = \frac{P'_k}{P'_k + R} \quad (3.6)$$

Où R présente la variance de mesure comprise entre \pm slot de temps de la valeur réelle du moment de réception des données, et P'_k est la variance estimée. Au début, nous devons choisir une valeur initiale pour P_k , c'est-à-dire P'_k . Si notre état initial estimé $\hat{x}'_k = 0$, nous laisserions $P'_k = 0$. Cependant, étant donné l'incertitude de notre estimation initiale \hat{x}'_k , choisir $P'_k = 0$ mènerait le filtre pour toujours croire que $\hat{x}_k = 0$. Comme il s'avère que le choix alternatif est critique. Nous devons choisir presque n'importe quel $P'_k \neq 0$ et le filtre finira par converger. Dans notre cas, nous allons commencer avec $P'_k = 1$. Cela signifie que nous faisons davantage confiance à la mesure qu'à nos suppositions.

$K \rightarrow 1$ signifie que la mesure est plus fiable.

$K \rightarrow 0$ signifie que notre proposition est plus fiable.

Par expérience, nous savons que les vraies valeurs du moment de réception des données suivent une distribution de probabilité normale, nous allons commencer en supposant que le moment est 0. En d'autres termes, avant de commencer, on laisse $\hat{x}'_k = 0$. Et nous calculons l'estimation :

$$\hat{x}_k = \hat{x}'_k + K \times (z_K - \hat{x}'_k) \quad (3.7)$$

Ensuite, nous devons calculer la variance d'estimation P_k .

$$P_k = (1 - K_k) \times P'_k \quad (3.8)$$

Dans le filtre de Kalman, nous estimons, mettons à jour et répétons le processus tant que nécessaire. Dans notre cas, ce processus sera répété pour chaque mesure (moments de réception des données). Nos équations de mise à jour des moments sont :

$$P'_{k+1} = P_k \quad (3.9)$$

$$\hat{x}'_{k+1} = \hat{x}_k \quad (3.10)$$

3.3.4 Paramètres de simulation

Dans cette section, nous validons le modèle analytique du protocole KF-MAC en évaluant ses performances à l'aide du simulateur NS-2. Les résultats sont comparés à ceux de la norme IEEE 802.15.4 et du protocole S-MAC. L'évaluation porte sur la manière dont les nœuds de capteur économisent de l'énergie sans dégrader le PDR ni le temps de latence.

Dans cette simulation, nous considérons un scénario contenant 99 nœuds de capteurs connectés à un nœud de coordination (100 nœuds de capteur au total). Le nœud de coordination a une source d'énergie illimitée. Tous ces nœuds de capteurs utilisent le protocole KF-MAC et sont déployés de manière aléatoire dans la zone surveillée. Pour valider les performances du protocole KF-MAC, nous évaluons le délai de bout en bout (latence), le taux des paquets délivrés (PDR) et la consommation d'énergie. Pour ce faire, nous utilisons d'abord le trafic à débit constant (Constant Bit Rate (CBR)), ensuite, nous utilisons un trafic exponentiel caractérisé par une phase active (ON), où la source peut envoyer des données et s'arrête pour envoyer un message pendant le temps passif (OFF). Les périodes active et passive (ON, OFF) sont distribuées de manière exponentielle avec les moyens $1/\lambda_{ON}$ et $1/\lambda_{OFF}$ respectivement. Tous les résultats de la simulation sont calculés sur 50 simulations. Les résultats de la simulation sont effectués avec

les paramètres présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 – PARAMÈTRES DE SIMULATION

| Paramètres | Valeurs |
|-----------------------------------|-----------------|
| Nombre de nœuds | 100 |
| Mode de propagation | Two-Ray-Ground |
| Protocole de routage | AODV |
| Type de la topologie | Mesh |
| Taille de la topologie | 300 x 300 m^2 |
| Taille de paquet de donnée | 100 B |
| Consommation en mode veille | 14.4 (mW) |
| Consommation en mode transmission | 36.0 (mW) |
| Consommation en mode endormi | 0.015 (mW) |
| Temps de simulation | 1000 (s) |

3.3.5 Résultats de la simulation

Pour les simulations, nous nous intéressons au mode de fonctionnement Beacon-Enabled du standard IEEE 802.15.4. Nous utilisons deux scénarios dans lesquels les nœuds capteurs sont déployés de manière aléatoire. Premièrement, nous considérons un scénario dont le trafic généré est de type exponentiel, deuxièmement, nous considérons un scénario utilisant un trafic périodique.

3.3.5.1 Résultats en utilisant un trafic périodique

Lors de la première étape de simulations, nous avons fixé le nombre de connexions (nombre de communications) à 10, et nous avons fait varier l'intervalle de transmission des paquets de 0.5s à 2.5s. Dans la seconde étape, nous avons fixé l'intervalle de transmission de paquets à 1.5 secondes et nous avons fait varier le nombre de nœuds émetteurs de 5 à 25. Cela nous aide à évaluer l'impact de la charge de communication et l'impact de la densité de trafic sur diverses métriques de performances.

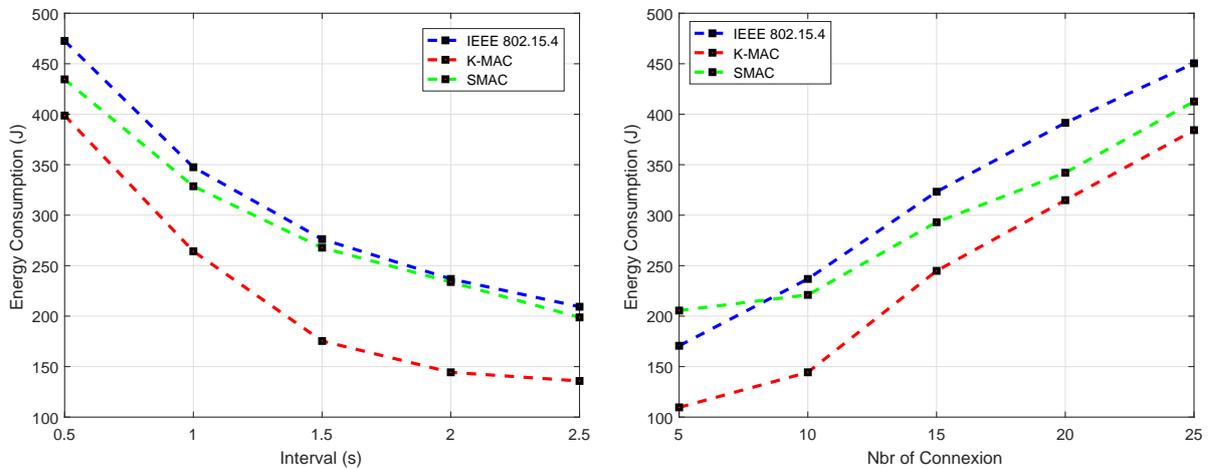


Figure 3.4 – RÉSULTATS DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Dans la première comparaison des métriques de performance, nous avons mesuré la consommation d'énergie moyenne. La moyenne énergétique consommée au cours de la simulation est obtenue en faisant la somme de l'énergie consommée à la fin de la simulation de chaque nœud, divisée par le nombre total de nœuds. Nous remarquons que la consommation d'énergie augmente proportionnellement au nombre de paquets. La figure 3.4 montre que le protocole KF-MAC consomme toujours moins d'énergie que le standard IEEE 802.15.4 et le protocole S-MAC, que ce soit dans le cas de trafic faible ou élevé. Cela est dû au fait que les nœuds capteurs sont plus endormis, grâce au mécanisme de prévision qui réveille les nœuds uniquement si un événement (réception de données) se produirait probablement. Les nœuds capteurs ne gaspilleront pas d'énergie provoquée par la surécoute ou l'écoute passive, ce qui permet aux nœuds de rester plus longtemps en vie. En conséquence, toute la durée de vie du réseau sera prolongée.

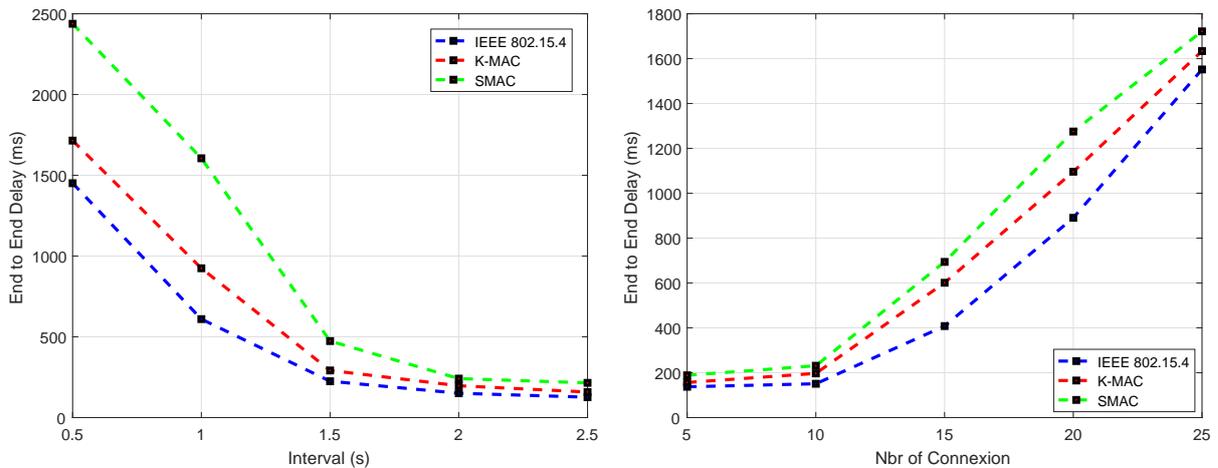


Figure 3.5 – RÉSULTATS DE LA LATENCE MOYENNE

Le délai de bout en bout mesure le coût moyen en temps entre la réception et l'envoi des paquets de données. Cela représente la stabilité et la fiabilité du réseau. Plus la latence est réduite, plus le protocole est robuste. La figure 3.5 montre que le délai de bout en bout de KF-MAC connaît une légère augmentation par rapport à celui de la norme IEEE 802.15.4. La raison derrière ce petit retard est le fait de toujours reporter la dernière tentative de transmission de données à la prochaine super-trame. De plus, quand il y a plusieurs nœuds émetteurs en compétition pour accéder au support de transmission, la probabilité d'avoir plus de collisions augmente, le processus de backoff pouvant dégrader la qualité de service des protocoles MAC. Lorsque les collisions se produisent, un nœud de capteur doit attendre un temps de backoff avant de retransmettre les paquets de données. En outre, une collision persistante entraîne la retransmission de paquets de données plusieurs fois, ce qui entraîne un délai plus long de bout en bout.

Dans la figure 3.6, le PDR diminue dans deux cas, soit dans le cas où le nombre de communications dans le réseau augmente. Ou dans le cas où l'intervalle de transmission de paquets de données diminue. Cela est dû à la probabilité croissante de pertes de paquets dues aux collisions. Le protocole KF-MAC conserve le même taux de paquets livrés que le standard IEEE 802.15.4 dans tous les cas d'évaluation, même s'il existe une forte probabilité d'avoir les nœuds en mode endormi à cause du mécanisme de prédiction. Le protocole KF-MAC présente une solution efficace qui permet de réserver la consommation d'énergie des nœuds de capteur sans augmenter le nombre de paquets perdus et c'est grâce au mécanisme PDI basé sur le report de la dernière tentative de transmission de données.

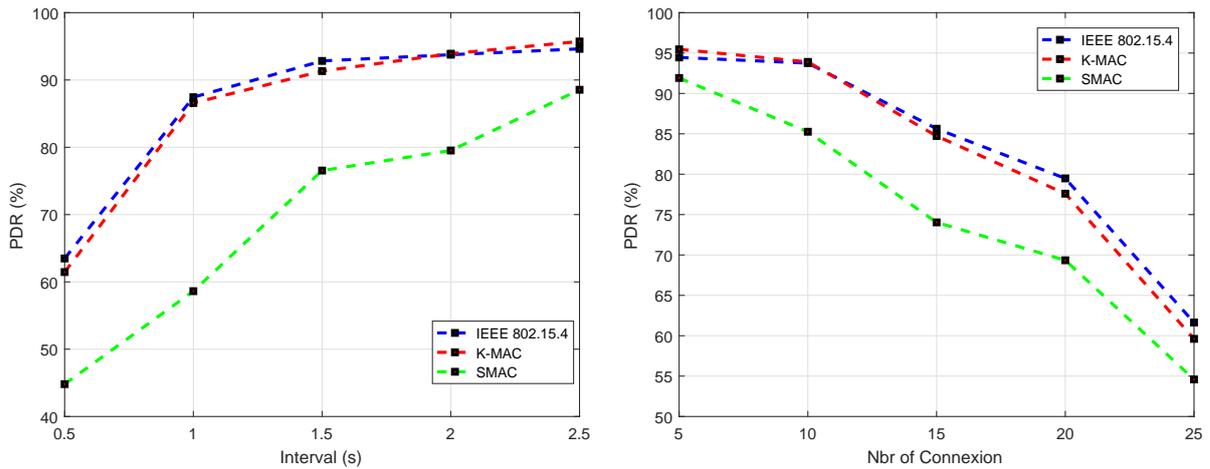


Figure 3.6 – RÉSULTATS DU TAUX DE PAQUETS DÉLIVRÉS

3.3.5.2 Résultats en utilisant un trafic exponentiel

Dans cette partie des simulations, nous supposons que les événements survenus suivent la distribution exponentielle. Premièrement, nous avons fixé le nombre de communication à 20, ensuite, nous avons varié le temps moyen entre les événements de 10 à 210 ms. Deuxièmement, nous avons fixé le temps moyen entre les événements à 210 ms et nous avons fait varier le nombre de connexions (nombre de communications) de 5 à 25. Cela nous aide à évaluer l'impact de la densité du trafic et celui de la charge de communication sur les différentes métriques de performance du protocole KF-MAC. Plus de 100 000 événements ont été produits dans chaque cas de simulation.

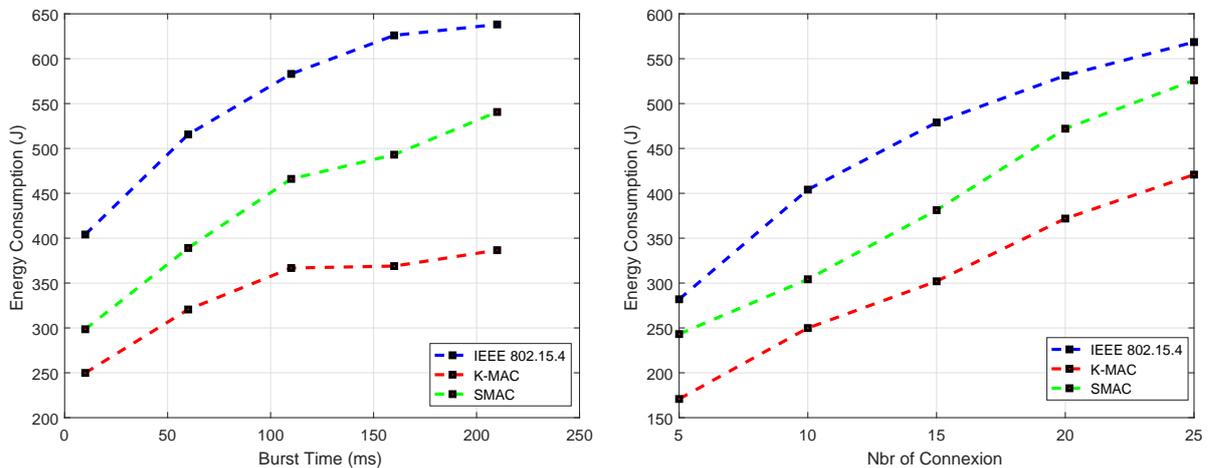


Figure 3.7 – RÉSULTATS DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Prolonger la durée de vie du réseau est le défi le plus important à résoudre dans les RCSF. Cependant, il s'avère que lorsque la génération de paquets de données augmente, la consommation d'énergie des nœuds de capteur augmente également. Selon la figure 3.7, il est clair que le protocole KF-MAC est une meilleure solution pour réduire la consommation d'énergie des nœuds capteur. Le protocole KF-MAC est très puissant au sens de la réduction de la consommation d'énergie par rapport à la norme IEEE 802.15.4 et au protocole S-MAC. Que ce soit en

cas de charge de communication élevée ou en cas de trafic intense. Ceci est dû au calcul du filtre de Kalman qui estime le temps où les nœuds de capteurs doivent être actifs pour recevoir des paquets de données.

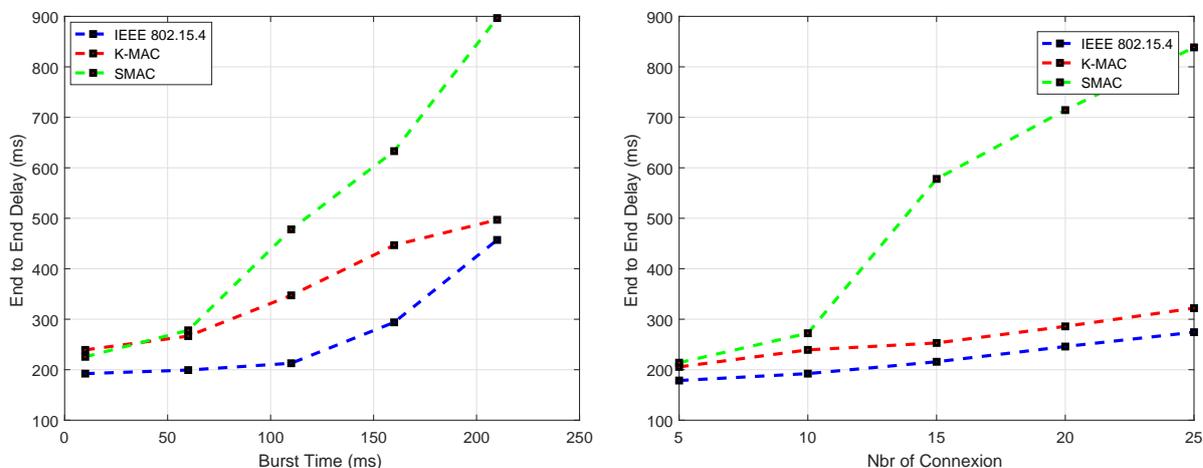


Figure 3.8 – RÉSULTATS DE LA LATENCE MOYENNE

En ce qui concerne la latence de la figure 3.8, nous notons que le protocole KF-MAC souffre d'un retard par rapport à la norme IEEE 802.15.4. Le délai de bout en bout obtenu par le protocole KF-MAC connaît une légère augmentation. Cette différence ne dépasse pas 150 ms dans le pire des cas.

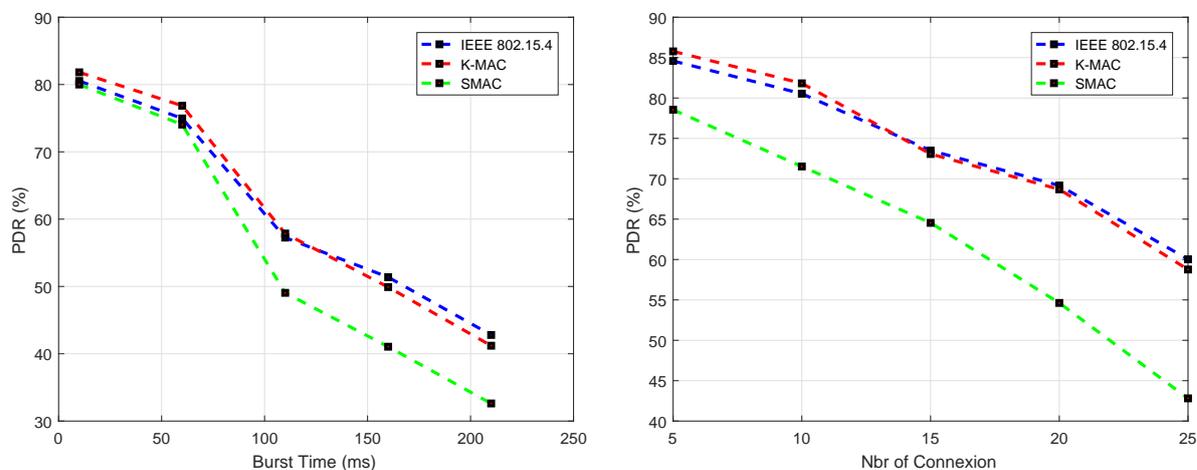


Figure 3.9 – RÉSULTATS DU TAUX DE PAQUETS DÉLIVRÉS

La figure 3.9 prouve que même en cas d'augmentation du nombre de nœuds sources ou en cas de trafic intense, le protocole KF-MAC conserve le même PDR que le standard IEEE 802.15.4. Le protocole KF-MAC est une véritable solution pour économiser l'énergie des nœuds en mode balise sans augmenter le nombre de paquets perdus et sans provoquer une latence critique.

3.4 Cycle de fonctionnement adapté pour l'optimisation de l'énergie dans les RCSF

Dans cette partie, nous proposons un nouveau protocole de communication basé sur la norme IEEE 802.15.4, appelé AD-MAC (Adaptive Duty Cycle MAC), qui vise à réduire la dissipation d'énergie lorsque l'émetteur-récepteur attend des paquets de données potentiels. Le protocole AD-MAC vise principalement à réduire la consommation d'énergie des capteurs en mode Beacon-Enabled via une technique de cycle de fonctionnement dynamique. Le protocole AD-MAC optimise l'intervalle de veille entre les réveils consécutifs sans influencer négativement sur les performances du réseau. Cette solution utilise un nouveau mécanisme de prévision pour estimer le moment où les capteurs se réveillent ou se mettent en veille en fonction des statistiques de charge de trafic précédentes. Les résultats de la simulation via le simulateur NS-2 montrent que le protocole AD-MAC est supérieur à la norme IEEE 802.15.4 en termes de réduction de la consommation d'énergie et de taux de livraison des paquets (PDR).

3.4.1 Travaux connexes

Dans la littérature, de nombreuses études ont abordé les problèmes de RCSF et ont proposé des solutions pouvant être appliquées au niveau de la couche MAC. Les protocoles MAC proposés visent à réduire la dissipation d'énergie due au problème d'écoute passive. Ils reposent sur le même principe de duty-cycle afin de prolonger la durée de vie du réseau en optimisant la consommation d'énergie de l'émetteur-récepteur.

Dans [116], les auteurs ont prouvé que le processus d'écoute consomme de 50% à 100% de l'énergie des nœuds. Les travaux récents tels que [117] ont adopté un cycle veille/réveil synchronisé pour permettre aux nœuds d'économiser de l'énergie. Plusieurs travaux de recherche ont été proposés dans le contexte de la maximisation de la durée de vie des nœuds capteurs et sont basés sur la norme IEEE 802.15.4. Dans [118], les auteurs ont proposé l'algorithme GSAA (GTS Size Adaptation Algorithm), qui définit un nouveau processus d'allocation GTS permettant de définir la taille de GTS afin de l'adapter en fonction de la taille des données des nœuds. Les auteurs de [119] ont présenté une solution multicouche au problème de l'élection des coordinateurs du PAN ; cette solution est une formation de topologie de processus du réseau, et qui fonctionne au niveau de la couche MAC de la norme IEEE 802.15.4 à l'aide d'un algorithme de reconfiguration de la topologie défini au niveau de la couche réseau. Dans [120], les auteurs ont proposé (an Adaptive Collision Resolution (ACR)) ; Cette approche ajuste les périodes de backoff afin d'éviter le temps et la direction d'une évaluation complémentaire du canal libre (CCA) en fonction du temps restant estimé pendant lequel le canal devient inactif. Les auteurs de [121] ont conçu une méthode adaptative d'accès au canal hybride CSMA TDMA afin de résoudre certaines faiblesses de la méthode CSMA/CA slottée. Dans [122], les auteurs ont proposé un protocole MAC efficace de réservation des slots de temps pour réduire la consommation d'énergie et améliorer l'efficacité de la transmission des données collectées dans les réseaux de capteurs sans fil. Les auteurs de [123] ont proposé un nouvel algorithme appelé Algorithme d'apprentissage du cycle de service (DCLA), ce dernier ajuste le cycle de service pendant la durée d'exécution afin d'économiser la consommation d'énergie tout en équilibrant la probabilité de réussite de la livraison des données et les contraintes de délai de l'application. Les auteurs de [124] ont proposé un nouveau protocole MAC multi-sites appelé OPWUM (OPportunistic Wake-Up MAC), qui utilise une contention basée sur un minuteur. Ce protocole permet la sélection opportuniste du meilleur récepteur parmi ses nœuds voisins en fonction d'une métrique donnée (par exemple, l'énergie restante) et exploite l'alarme émergente des récepteurs pour réduire la consommation d'énergie des nœuds. Dans [125], les auteurs ont modélisé et simulé une véritable plate-forme matérielle WuR (Wakeup

Radio) développée par les auteurs eux-mêmes sur le simulateur OMNET++. L'efficacité énergétique, la latence et le PDR de la plate-forme WuR sont comparés aux performances de quatre des protocoles MAC largement utilisés pour RCSF dans trois déploiements réels de réseau. Les auteurs de [126] ont utilisé la chaîne de Markov pour modéliser les paquets en attente dans le tampon de transmission/réception du nœud et calculer la probabilité de dépassement de tampon. Ils ont également formulé le problème d'optimisation (OP) qui minimise la consommation d'énergie du nœud, la probabilité de débordement de la mémoire tampon et le débit de données. En outre, ils ont présenté le système de gestion de l'énergie basé sur l'OP appelé OBEMS (OP-Based Energy Management System). Leurs résultats montrent que la solution proposée réduit la consommation d'énergie tout en maintenant un PDR plus élevé. Dans [127], les auteurs visent à optimiser l'utilisation de l'énergie sur chaque réseau en proposant un protocole de routage. Le protocole proposé est nommé (An Efficient Routing Protocol Adopting Enhanced Cluster Formation Technique Accompanied by Fuzzy Logic for Maximizing Lifetime of WSN). Ce protocole est basé sur l'algorithme de méta-heuristique PSO (Particle Swarm Optimization) pour affecter certains des nœuds qui ont été omis aux clusters actuels afin d'éliminer le taux de formation de nœuds individuels. Et pour la sélection de CH, les auteurs ont été basés sur des paramètres tels que l'énergie résiduelle, la distance au voisin, la densité et la distance maximale. Les auteurs de [128] ont proposé un le protocole CLIF (Cross Layer Interactive Framework) pour équilibrer l'importance de mesures de performances critiques telles que le PDR et l'efficacité énergétique, afin de répondre aux exigences des applications temps réel dans un environnement dynamique. Le protocole CLIF attribue un degré élevé d'importance (priorité élevée) aux messages critiques afin de les valoriser dans le traitement. Les auteurs de [129] proposent un protocole de routage nommé OQoS-MRP (Optimized QoS Routing Protocol) pour les réseaux de capteurs sans fil. Ce protocole est conçu pour calculer un chemin multi-saut optimal entre l'émetteur et le récepteur. Basé sur divers paramètres de qualité de service, tels que la fiabilité, l'énergie, le délai, la distance jusqu'aux puits et le nombre de sauts, le protocole OQoS-MRP choisit le meilleur chemin pour transférer les données à la station de base.

3.4.2 Le mode de fonctionnement du protocole AD-MAC

Dans cette partie, nous nous intéressons aux protocoles déterministes MAC dans lesquels nous visons à réduire la consommation d'énergie et à contrôler l'accès au support en fonction des statistiques précédentes sur la charge de trafic. Le protocole AD-MAC est basé sur le mode Beacon-Enabled de la couche MAC de la norme IEEE 802.15.4 [74]. Ainsi que les mécanismes CCA et CSMA/CA slotté permettant aux nœuds d'accéder au canal de transmission. Le nœud de coordination de réseau diffuse périodiquement des trames de balises, et nous supposons qu'il n'a aucune contrainte d'énergie.

Chaque nœud capteur de réseau applique le même cycle opérationnel, qui comprend deux périodes : périodes active et inactive. Durant la période inactive, un nœud conserve sa consommation d'énergie en désactivant son émetteur-récepteur. Alors que dans la période active, un nœud est prêt à recevoir ou à transmettre des données et son émetteur-récepteur est activée.

La période active est divisée en plusieurs slots de temps : chaque slot de temps peut être à l'état actif ou inactif selon un traitement réparti basé sur un mécanisme de prédiction. Ce mécanisme de prédiction permet aux nœuds du réseau d'estimer le moment où une réception de données peut avoir lieu et, par conséquent, les nœuds décident de passer à l'état actif ou inactif pendant un slot de temps, ce qui explique pourquoi chaque nœud du réseau aura son propre schéma de duty-cycle (voir figure 3.10). Autrement dit, le mécanisme de prédiction adaptera le duty-cycle à la charge de trafic des nœuds.

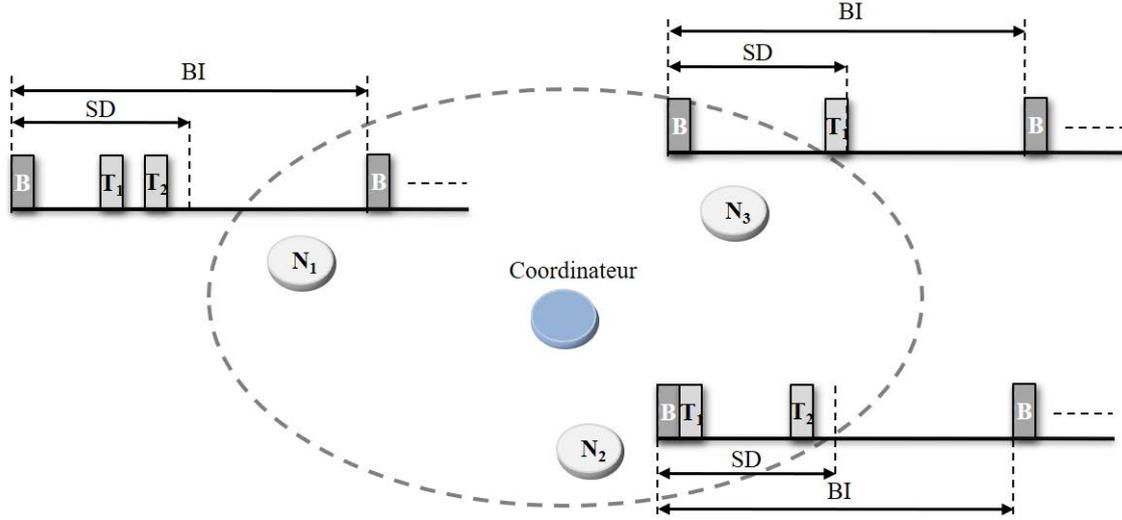


Figure 3.10 – CONFIGURATION DE LA SUPER-TRAME AD-MAC

La figure 3.10 illustre le fonctionnement de base de notre solution. Chaque nœud capteur se réveille selon son propre calendrier pour vérifier si des données lui sont destinées. Le nœud qui souhaite transmettre des données doit attendre la partie SD de la super-trame, ensuite, il doit activer son émetteur-récepteur et utiliser la technique CSMA/CA slotté pour accéder au canal.

Afin de modéliser l'émetteur-récepteur des nœuds capteur avec un duty-cycle dynamique, nous considérons un réseau composé d'un certain nombre de nœuds fonctionnant selon une configuration SD spécifique. Nous considérons également que la partie active de la SD est composée d'un certain nombre de slot de temps noté NTS . Un nœud reçoit les paquets de données aux instants $t_{k,1}, t_{k,2}, t_{k,3}, \dots, t_{k,n_i} \in R$ où $k \in [1, NTS]$, et n_i est le nombre de paquets reçus au slot de temps i . Ces paquets arrivent à chaque nœud indépendamment.

Au début, tous les slots de temps de la partie SD de la super-trame sont maintenus à l'état actif. Ensuite, chaque probabilité de réveil de chaque donnée dans un TS a été notée : $W = [w_{1,1}, \dots, w_{1,n_1}, \dots, w_{2,1}, \dots, w_{2,n_2}, \dots, w_{NTS,1}, \dots, w_{NTS,n_{NTS}}] \in R$, qui dépendra du nombre de paquets reçus et qui sera calculé avec l'équation 3.11.

$$W_{i,j} = \frac{n_j}{\sum_{i=1}^{NTS} n_i} \quad (3.11)$$

Où $i \in [1, NTS]$. En d'autres termes, tous les instants de paquets reçus dans le même slot de temps auront la même probabilité de réveil. Ensuite, notre système peut être décrit par l'équation suivante :

$$Y = \sum_{i=1}^{NTS} P_i \sum_{j=1}^{n_i} w_{i,j} t_{i,j} + \sigma n \quad (3.12)$$

Nous posons $n \triangleq \sum_{i=1}^{NTS} n_i$, qui correspond à tous les paquets reçus au cours de la précédente super-trame. Avec $P \in R^{n \times n}$ est une matrice de covariance diagonale entre les slots de temps avec les entrées P_i et la multiplicité n_i avec $i = 1, \dots, NTS$ et $T = [t_1^t; \dots; t_{NTS}^t] \in R^n$, où $t_k \in R^{n_i}$ pour $i = 1, \dots, NTS$ et t_k est un vecteur avec j^{th} entrée $t_{k,j}$.

$$P = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} P_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_1 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & P_1 \end{bmatrix} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \begin{bmatrix} P_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_2 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & P_2 \end{bmatrix} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \begin{bmatrix} P_n & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_n & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & P_n \end{bmatrix} \end{pmatrix}$$

On obtient le vecteur $Y \in R^n$ contenant les moments estimés. $\sigma n \in R^n$ est un bruit à l'instant t qui est supposé gaussien et $t_{i,j}$ est l'instant où le paquet j est reçu au slot de temps i , qui est également supposé gaussien. Nous supposons que nous connaissons parfaitement σ^2 . L'équation peut être écrite sous la forme :

$$Y = PWT + \sigma n \quad (3.13)$$

Comme résultat du calcul du mécanisme de prédiction, nous aurons un vecteur contenant les instants où le nœud doit activer son émetteur-récepteur pour probablement recevoir des données. Ces instants doivent obligatoirement être ajustés pour appartenir à l'intervalle de la partie active de la super-trame $[0, SD(SD = 2^{SO} \times aBaseSuperframeDuration)]$. Où SO est un paramètre utilisé pour fixer la durée active de la super-trame, $aBaseSuperframeDuration$ est une constante égale à $15.36ms$. L'équation 3.11 nous permet d'ajuster avec précision les instants estimés.

$$Y_{adjusted} = \left\lfloor \frac{(Y_{estimated} - bcnRxTime)}{aBaseSuperframeDuration} \right\rfloor \quad (3.14)$$

Où $bcnRxTime$ signifie l'instant auquel la dernière balise est reçue, toutes les valeurs $Y_{adjusted}$ appartiennent à l'intervalle $[0, SD] \in N$ et qui correspondent exactement aux numéros de slot de temps dans lesquels le nœud peut recevoir des données.

Grâce à ce mécanisme de prédiction, les nœuds de réseau ne deviennent actifs que lorsqu'ils ont probablement des données à recevoir. Par conséquent, il est possible qu'une communication donnée ait une destination inaccessible pour le moment, ce qui peut influencer négativement sur le PDR. Pour faire face à ce défi, le protocole AD-MAC a créé une nouvelle procédure qui consiste dans la première étape à reporter la dernière tentative de transmission à la super-trame suivante, puis à envoyer un nouveau paquet appelé trame de report de données (DPF (Data Postponing Frame) voir le tableau 3.11) au nœud coordination du réseau. Ce nouveau paquet est destiné à informer le nœud coordinateur que le nœud Y (destination) a été interrogé par le nœud X (source) à l'instant t_x . Cette information sera transmise au nœud Y (destination) via la prochaine trame balise. À cette fin, le protocole AD-MAC a modifié la trame de balise en ajoutant deux nouveaux champs. Le premier champ (2 octets) doit contenir l'identificateur du nœud de destination, tandis que le second champ (2 octets) doit contenir l'instant de la première tentative de transmission. Et, comme nous l'avons mentionné précédemment, au début de chaque super-trame, le nœud coordinateur diffuse la trame balise. Cette trame sera reçue par tous les nœuds de réseau, mais seul le nœud dont l'identificateur est égal à celui inséré dans le

premier nouveau champ peut lire le contenu du deuxième champ afin de l'inclure dans le calcul du mécanisme de prédiction.

Tableau 3.3 – FORMAT DU PAQUET PDF

| Octets : 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
|------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|----------------------------|
| Frame Control | Sequence Number | Concerned Node ID | Instant of the First attempt | FCS (Frame Check Sequence) |
| MHR (MAC Header) | | MAC Payload | | MFR (MAC Footer) |

3.4.3 Simulation du protocole AD-MAC

Pour valider notre analyse numérique, nous évaluons le modèle proposé sous différents nombres de nœuds, différents types de trafic, et comparons les résultats du PDR, de latence et de l'efficacité énergétique obtenues par le protocole AD-MAC avec ceux de la norme IEEE 802.15.4 et du protocole SMAC en utilisant le simulateur de réseau (NS-2). Nous considérons donc 99 nœuds de capteurs connectés au nœud de coordination et déployés de manière aléatoire dans le réseau. Dans la simulation, chaque nœud émetteur sélectionne de manière aléatoire l'un de ses voisins comme destination. Dans la première étape de notre simulation, le nœud émetteur génère une charge de trafic déclenchée par des événements, caractérisée par un trafic exponentiel ON/OFF. Dans la seconde étape de la simulation, le nœud de capteur génère un trafic périodique CBR (Constant Bit Rate). Les résultats de simulation sont calculés sur la moyenne de 50 simulations. Les paramètres de simulation sont illustrés dans le tableau 3.2.

3.4.3.1 Résultats de la simulation sous un trafic exponentiel

Dans cette section, le PDR, la consommation d'énergie et le temps de latence moyen sont évalués à l'aide du trafic exponentiel. Les mesures de performance du réseau sont examinées afin d'analyser l'impact de la charge de communication et de la densité de trafic sur le comportement du protocole AD-MAC.

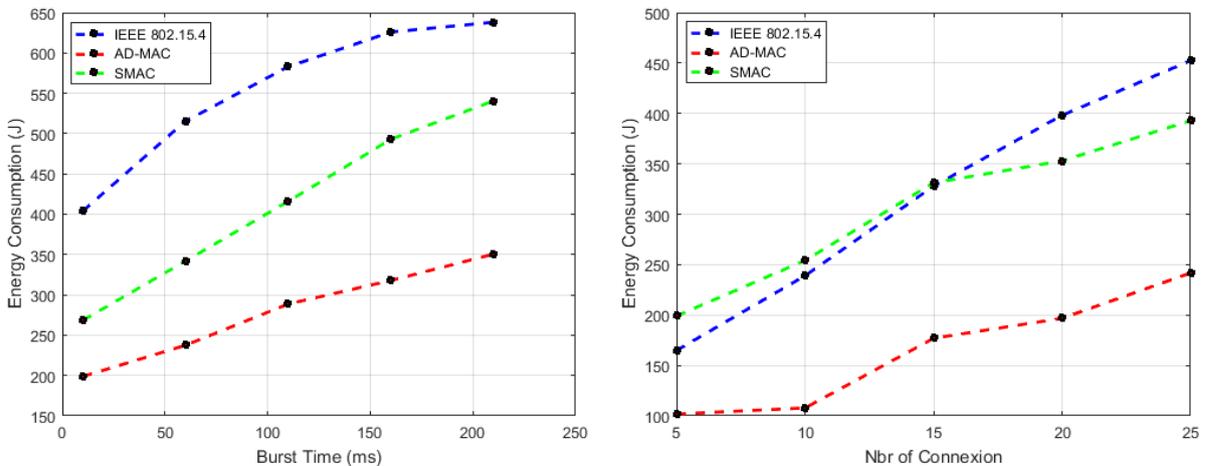


Figure 3.11 – RÉSULTATS DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

En règle générale, lorsque le nombre de nœuds émetteurs ou la période ON du trafic exponentiel augmente, la consommation d'énergie augmente également. Dans la figure 3.11, nous observons que le protocole AD-MAC surpasse largement la norme IEEE 802.15.4 en termes de réduction de la consommation d'énergie. Cela s'explique par le fait que le protocole AD-MAC réveille les nœuds de capteur précisément lorsqu'ils ont une probabilité élevée de recevoir des données. De ce fait, les nœuds de réseau deviennent moins actifs et réduisent considérablement leur consommation d'énergies.

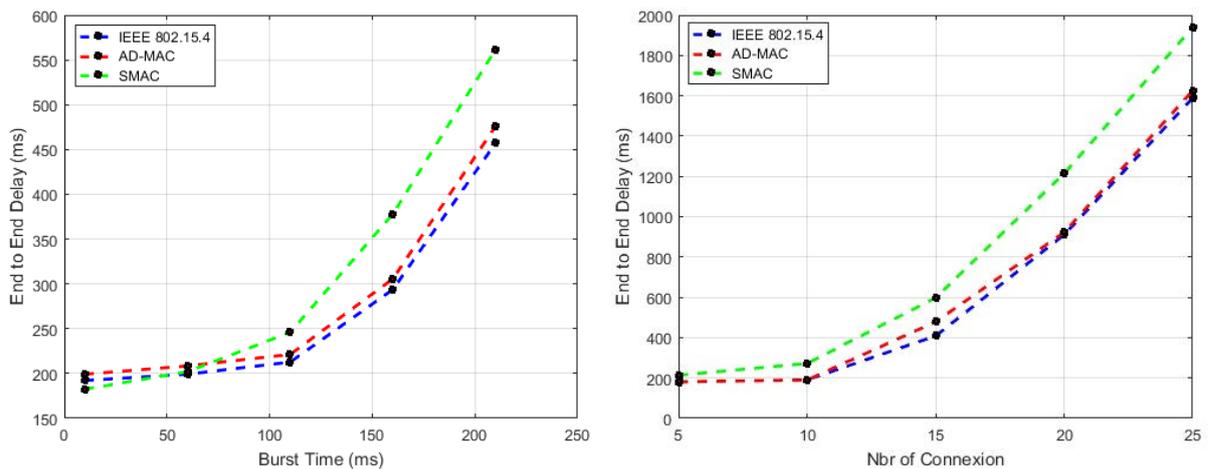


Figure 3.12 – RÉSULTATS DE LA LATENCE

Normalement, lorsque la densité du trafic ou la charge de communication sur le réseau devient élevée, le délai de livraison de bout en bout devient également important en raison de la retransmission régulière des paquets due à la collision. La figure 3.12 montre qu'il existe une petite différence entre la latence du protocole AD-MAC et celle de la norme IEEE 802.15.4. Cela peut s'expliquer par le moment où un nœud envoie un paquet de données à une destination qui passe en mode veille en raison de son mécanisme de prédiction. Par conséquent, la dernière tentative de transmission de ce paquet sera reportée à la super-trame suivante, ce qui provoquera un délai supplémentaire.

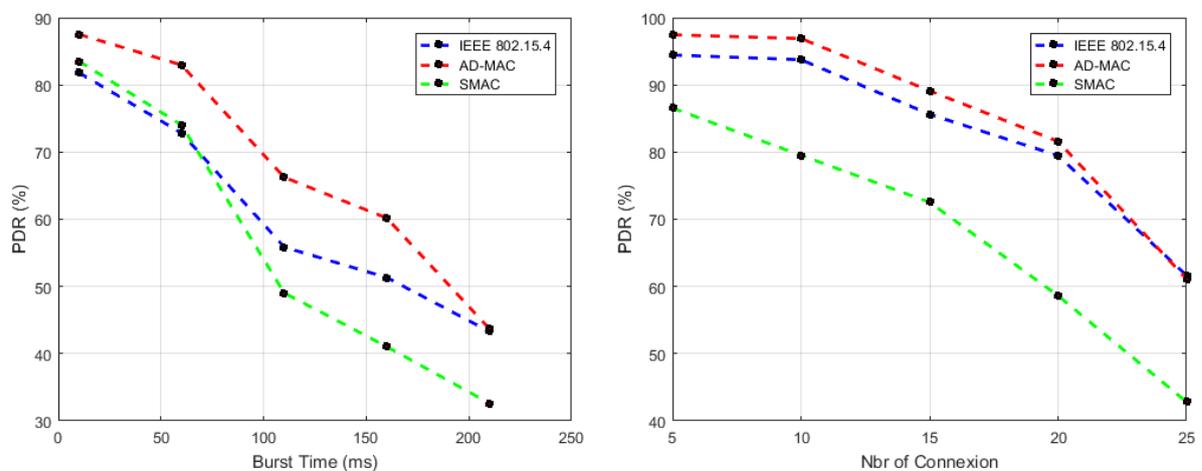


Figure 3.13 – RÉSULTATS DE PDR

La figure 3.13 montre que le PDR obtenu par le protocole AD-MAC dépasse largement

celui de la norme IEEE 802.15.4, en particulier en cas de faible et moyenne charge de trafic. Ces résultats sont prouvés par la précision du mécanisme de prévision, car nous estimons exactement à quel moment un nœud doit se réveiller pour recevoir efficacement ses données. De plus, même si nous augmentons la charge de trafic sur le réseau, le PDR du protocole AD-MAC reste meilleure que celui obtenu par le standard IEEE 802.15.4.

3.4.3.2 Résultats de simulation sous un trafic périodique

Dans cette section, le comportement du protocole AD-MAC est examiné à l'aide du trafic CBR. Les mesures de performance du réseau sont évaluées dans un premier temps en fixant le nombre de communications à 10 et en faisant varier l'intervalle de transmission des paquets de 0.5 à 2.5 s. Dans la seconde étape de cette simulation, l'intervalle de transmission des paquets entre les événements est fixé à 1.5 seconde. Ensuite, nous avons varié le nombre de communications dans le réseau de 5 à 25.

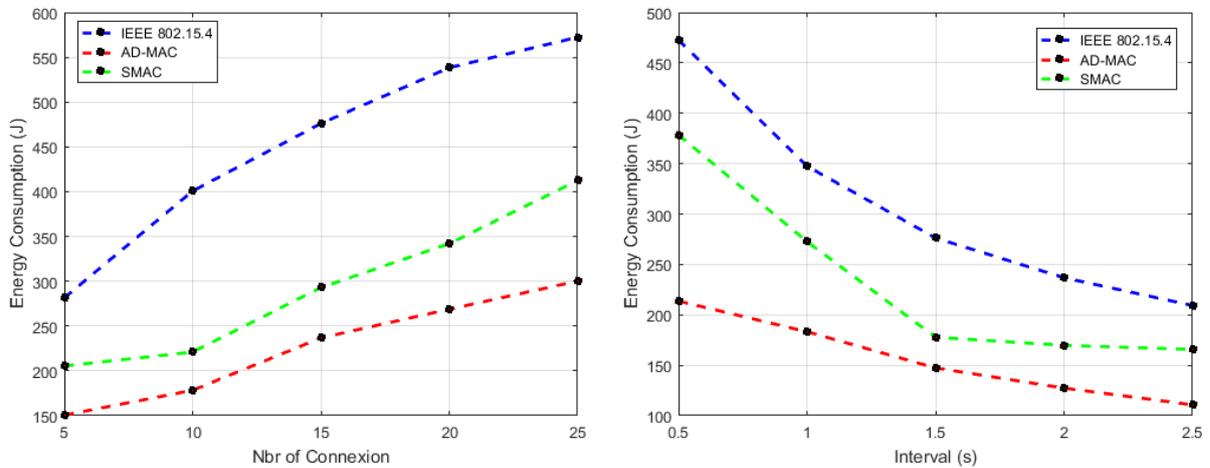


Figure 3.14 – RÉSULTATS DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Les résultats présentés dans la figure 3.14 prouvent l'efficacité du protocole AD-MAC en termes de conservation de l'énergie grâce à son processus de prévision qui a considérablement réduit le temps d'écoute. Selon ces courbes, le protocole AD-MAC arrive parfaitement à adapter le duty-cycle avec la charge de trafic des nœuds capteur. Par conséquent, le protocole AD-MAC constitue une meilleure solution pour une consommation d'énergie efficace.

Dans la figure 3.15, nous remarquons qu'il n'y a pas de différence entre le délai de livraison de bout en bout obtenu par le protocole Ad-MAC et celui de la norme IEEE 802.15.4 même si nous augmentons la charge de communication, ce qui prouve que le nombre de paquets retransmis (paquets reportés) a diminué. Dans ces expériences, nous avons utilisé un trafic CBR caractérisé par la génération d'événements périodiques. Par conséquent, nous pouvons dire que le processus de prévision converge pour estimer correctement les périodes de génération d'événements.

Les résultats illustrés dans la figure 3.16 montrent qu'il existe une différence significative entre les deux courbes, en particulier lorsque la charge de trafic sur le réseau est faible ou moyenne. Le protocole AD-MAC améliore le PDR en minimisant les pertes de paquets dues à la collision. AD-MAC a obtenu ces résultats grâce à la procédure de report de paquet qui permet au nœud émetteur de reporter la dernière tentative de retransmission à la super-trame suivante où le nœud de destination a une forte chance d'être accessible.

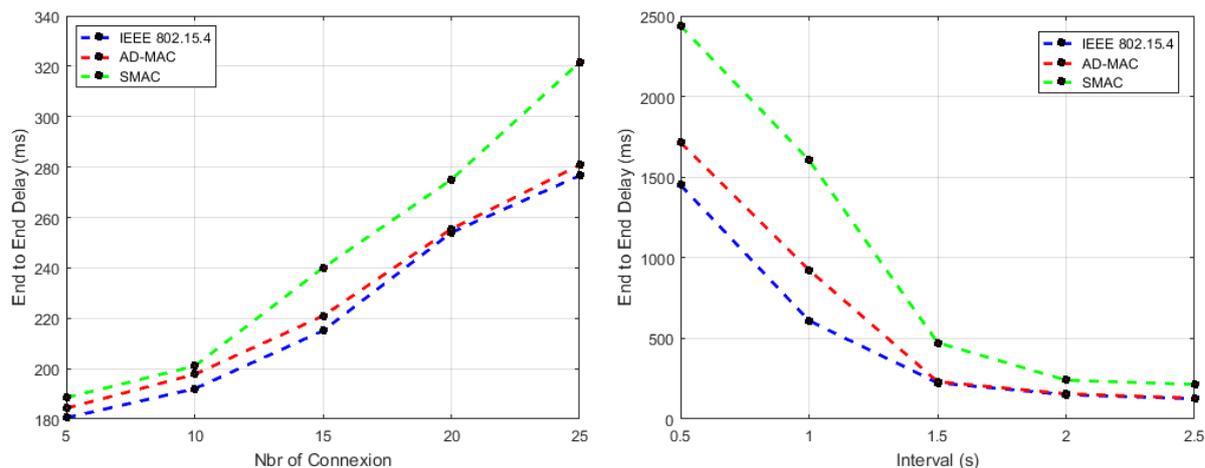


Figure 3.15 – RÉSULTATS DE LA LATENCE

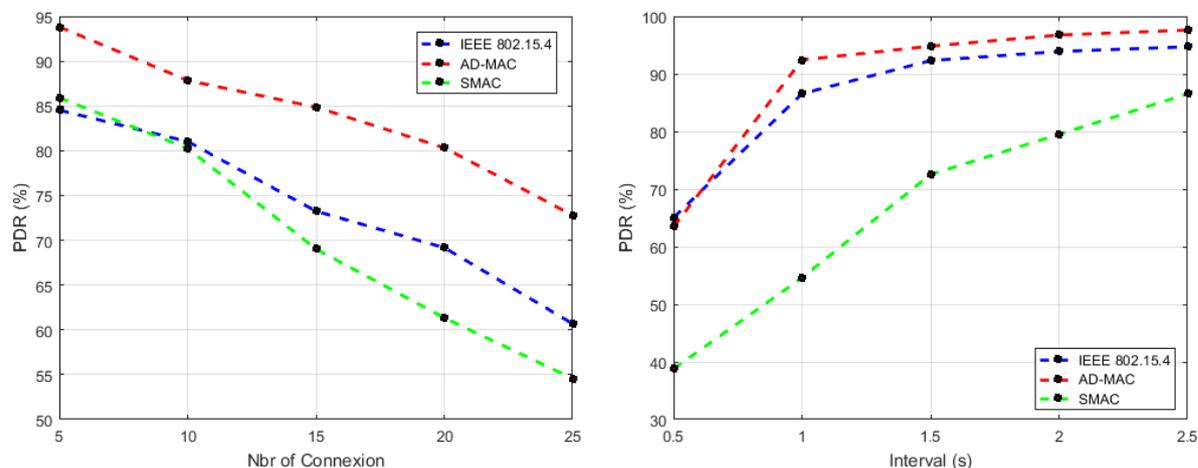


Figure 3.16 – RÉSULTATS DE PDR

3.5 Conclusion

Les RCSF nécessitent une couche MAC adaptative capable de gérer le comportement en rafale de l'application. Nous avons constaté que les protocoles MAC existants ne traitent pas efficacement la contrainte d'énergie de ces réseaux. Dans ce chapitre, nous avons proposé deux protocoles MAC simples à utiliser et efficaces sur le plan énergétique. Dans la première contribution nous avons conçu le protocole KF-MAC, qui présente une couche MAC à faible consommation d'énergie basée sur le filtre de Kalman. Ce filtre d'estimation adapte le temps de l'émetteur-récepteur au comportement des charges de trafic des nœuds capteurs. Son objectif principal est de prolonger la durée de vies des nœuds le maximum possible sans influencer négativement le PDR et la latence.

Tandis que dans la deuxième contribution, nous avons proposé le protocole AD-MAC, ce protocole permet de minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. AD-MAC ajuste périodiquement la structure de super-trames de chaque nœud en fonction de sa charge de trafic précédente. Et l'itération de cet ajustement amène rapidement tous les nœuds du réseau à optimiser efficacement l'énergie et à améliorer le PDR sans provoquer un délai de

transmission important. AD-MAC fonctionne de manière totalement distribuée, sans nécessiter de calcul central, de synchronisation temporelle globale ou de connaissance de l'état des nœuds voisins, et n'apporte aucune charge supplémentaire au réseau.

Les simulations visaient à évaluer les performances des deux contributions proposées en termes de réduction de réduction des coûts énergétiques et d'augmentation du PDR sans avoir une latence critique. Nous avons comparé les performances obtenues par les deux solutions proposées avec celles du standard IEEE 802.15.4 et le protocole S-MAC à l'aide du simulateur NS-2. En analysant les résultats de la simulation, nous pouvons conclure que les protocoles KF-MAC et AD-MAC réduisent efficacement l'énergie consommée par les nœuds capteurs, en plus, il améliore le PDR sans dégrader la latence, ce qui prouve profondément l'efficacité de ces protocoles.

DIFFÉRENCIATION DES RESSOURCES POUR LES RÉSEAUX HÉTÉROGÈNES

Sommaire

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1 | Introduction | 65 |
| 4.2 | S-MAC | 66 |
| 4.3 | Évitement des collisions basé sur l'énergie au niveau de la couche MAC pour les RCSF | 67 |
| 4.3.1 | Travaux connexes | 67 |
| 4.3.2 | Algorithme ECA-MAC | 68 |
| 4.3.3 | RÉSULTATS DE LA SIMULATION | 69 |
| 4.4 | Conclusions | 72 |

4.1 Introduction

Comme nous avons dit précédemment, la couche MAC de RCSF est la responsable sur la gestion de l'émetteur-récepteur des nœuds capteurs, et le contrôle d'accès au support de transmission. Dans le chapitre précédent, nous avons proposé deux contributions pour adapter le trafic de données aux modes d'activité de l'émetteur-récepteur des nœuds. L'idée principale de ces contributions consiste à activer les nœuds capteurs seulement s'ils ont probablement des données à recevoir ou à transmettre. En conséquence, les nœuds seront en mode endormi plus fréquemment et conserveront plus d'énergie. Dans ce chapitre, nous abordons la deuxième tâche de la couche MAC qui est la gestion d'accès au support de transmission.

Généralement, les RCSF sont déployés pour que les applications surveillent l'environnement et prennent parfois des mesures appropriées. Dans les applications qui nécessitent l'observation du comportement des phénomènes physiques, les nœuds capteurs doivent détecter et transmettre leurs mesures à des intervalles réguliers ou de manière ininterrompue appelés réseaux continus. Tandis que, dans d'autres types d'applications, nous utilisons une infrastructure commune pour remplir de nombreuses fonctions. Ce type de réseau met en évidence la nécessité de traiter les charges de trafic en fonction de leur nature. Pour relever de tels défis, nous proposons dans ce chapitre un algorithme appelé (ECA-MAC). Cet algorithme a pour but de différencier les services lorsque les nœuds tentent d'accéder au support. Les nœuds ayant un niveau d'énergie faible ont plus de chance d'envoyer leurs données efficacement à la première tentative. En outre, l'algorithme ECA-MAC résout le problème de collisions provoqué par la procédure de la fenêtre de contention. La suite de ce chapitre est organisée comme suit : un aperçu sur le fonctionnement du protocole S-MAC est présenté dans la section 4.1. Dans la section 4.2 le principe de fonctionnement du protocole ECA-MAC sera présenté. Les conclusions sont résumées à la section 4.3.

4.2 S-MAC

Le protocole (S-MAC) est proposé par Ye et al. [122]. Il est considéré comme la référence des protocoles MAC éco-énergétiques conçus pour les RCSF. Il s'agit du premier protocole utilisant les mécanismes d'écoute et de veille périodiques afin de minimiser la consommation d'énergie pendant les périodes de veille. Son idée principale est de diviser le temps de l'émetteur-récepteur en deux parties : active et veille. Lorsque l'interface radio est en mode actif, le capteur est prêt à échanger des données avec ses voisins, mais une fois en mode veille, il ne peut ni transmettre ni recevoir de message.

Les capteurs fonctionnent indépendamment les uns des autres. Par conséquent, la procédure de veille périodique peut provoquer une latence élevée lorsqu'un nœud souhaite transmettre des données à un autre nœud qui est en état de veille. Pour éviter ce problème, S-MAC propose une synchronisation entre les nœuds utilisant le paquet (Synchronization packet (SYNC)) qui est diffusé au début de la période d'écoute. Ce paquet informe les voisins du nœud de son calendrier (temps d'écoute et de sommeil).

La figure 4.1 décrit le duty-cycle de protocole S-MAC, où T_s est la durée de l'état veille et F_n est le cycle complet de la période active plus la période veille (appelé trame). Pour réduire le délai de transmission causé par les périodes de veille, Ye et al. [130] ont proposé une nouvelle méthode appelée écoute adaptative.

Cette dernière vise à réveiller les voisins de l'émetteur/récepteur à la fin de la transmission en cours. Si le voisin est concerné par le prochain échange, il doit rester en mode actif, sinon il repasse en mode veille jusqu'à la prochaine période d'écoute. En outre, dans [130], les auteurs ont proposé d'autres techniques pour éviter divers problèmes liés aux réseaux à grande échelle. Par exemple, pour résoudre le problème de la station cachée, le protocole S-MAC utilise le mécanisme RTS/CTS [131], qui consiste à envoyer un paquet RTS au nœud de destination, qui doit alors confirmer sa volonté de recevoir des données en répondant avec un message CTS. De plus, pour éviter le problème de sur-écoute, un nœud détient un vecteur d'allocation de réseau (Network Allocation Vector (NAV)) dans lequel il maintient les activités de ses voisins.

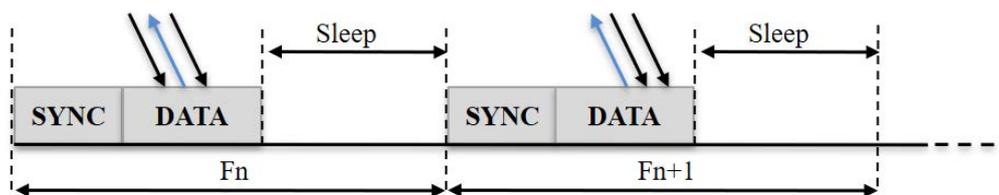


Figure 4.1 – FORMAT DE LA TRAME SMAC

Le principal inconvénient du protocole S-MAC est que son duty-cycle est statique (c'est-à-dire que le rapport entre le temps d'écoute et le temps de veille est fixe), qui empêche les capteurs de s'ajuster aux différentes charges du trafic réseau. En raison de la structure fixe du duty-cycle, les nœuds consomment la plus grande partie de leur énergie au repos lorsque la charge de trafic est faible. De plus, si le duty-cycle est réglé pour correspondre à une charge de trafic faible et que la charge de trafic devient élevée, le délai de communication augmentera. Le protocole fonctionne mieux lorsque la charge de trafic reste constante et prévisible.

4.3 Évitement des collisions basé sur l'énergie au niveau de la couche MAC pour les RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil sont de plus en plus utilisés pour des applications polyvalentes. Dans ces réseaux, il est nécessaire de différencier les services ou les ressources afin de fournir de bonnes performances aux données prioritaires. Dans un réseau la couche MAC est la responsable de la gestion de l'accès au support partagé, nous devons donc gérer la qualité de service sur cette couche afin de donner plus de chances aux nœuds ayant une priorité élevée d'accéder au support avant les autres. Le manque de ressources énergétiques était à l'origine de l'idée d'alterner l'émetteur-récepteur entre deux modes ; modes actif et inactif. Ce mécanisme est très efficace en termes de consommation d'énergie, mais il provoque une latence élevée qui dégrade la qualité de service pour les nœuds ayant un niveau d'énergie faible. Dans cette partie, nous présentons une nouvelle approche qui traite les contraintes d'énergie et de la qualité de service de RCSF conçue pour des applications polyvalentes. Notre protocole vise à contrôler l'accès au support en fonction de la priorité des nœuds et à réduire les collisions en utilisant différentes fenêtres de contention. Dans un RCSF nous devons prendre en compte plusieurs contraintes, à savoir l'optimisation de ressources énergétiques, l'augmentation de débit, la réduction de la latence, en particulier nous devons assurer une bonne qualité de service. Cette dernière peut être réalisée de deux manières :

- **Différenciation des services** : dans certaines applications, nous devons assurer une priorité d'un certain type de nœuds par rapport à d'autres. La différenciation des ressources est effectuée grâce à un marquage de nœuds pour identifier leurs niveaux d'énergie.
- **Service garanti** : consiste à réserver des ressources réseau pour certains types de nœuds, afin de leur garantir un accès au support de transmission. Les méthodes d'allocation de ressources réseau ont une grande fiabilité. Toutefois, les ressources attribuées peuvent dépasser le nombre nécessaire pour la transmission des messages des nœuds prioritaires, ce qui entraîne un gaspillage de ressources telles que la bande passante, le temps, la mémoire tampon, etc.

Dans ce chapitre, nous avons principalement pour objectif d'améliorer la qualité de service de réseaux hétérogènes en utilisant l'algorithme CSMA/CA qui ne considère pas la qualité de service. Toutefois, dans certaines applications, notamment dans le cas de réseaux hétérogènes, nous devons garantir une faible latence et donner plus de chances aux nœuds prioritaires.

4.3.1 Travaux connexes

Dans la littérature, de nombreux protocoles basés sur la contention se concentrent soit sur l'amélioration de la latence, soit sur la conservation de l'énergie, soit sur les deux. Le protocole PSIFT [132] a été conçu pour améliorer la qualité de service des applications événementielles présentant un problème redondant inutile. Dans le même temps, il vise à relayer les événements avec une faible latence. C'est un protocole MAC basé sur CSMA et il hérite de la plupart de ses fonctionnalités [133]. Dans ce protocole, le trafic est classé en fonction du nombre de sauts traversés, le niveau haut est attribué au paquet qui traverse le plus grand nombre de sauts. Alors que, dans [134], les auteurs proposent d'améliorer la qualité de service de la transmission multimédia sans influencer la contrainte d'énergie. Il est basé sur l'algorithme CSMA/CA et le mécanisme de duty-cycle. Dans cet article, les auteurs proposent de mettre à jour la taille de la fenêtre de contention en fonction de certaines mesures pertinentes du réseau, telles que le type de trafic transmis et le taux d'échec de transmission dans le réseau. En outre, dans (a

Priority Reservation MAC (PR-MAC)) [135], les auteurs définissent la priorité des paquets en fonction de l'événement surveillé et assurent ainsi la différenciation des services en faisant varier la taille de la CW et l'IFS pour chaque niveau de priorité. Afin de réduire le coût énergétique des collisions, l'émetteur envoie une courte impulsion pour réserver le support plutôt que d'utiliser un échange RTS/CTS. Dans le même type de service, les auteurs proposent un protocole MAC basé sur l'apprentissage par renforcement appelé (Reinforcement Learning based MAC (RL-MAC)) [136]. RL-MAC classe la charge de trafic en trois catégories et pour chaque nœud, la taille de la CW varie. En parallèle, le nœud change de façon dynamique son cycle de travail en fonction du nombre de tentatives d'envoi et de paquet ou de tentative de transmission ayant abouti, pour lui-même et pour ses voisins pendant le temps actif.

4.3.2 Algorithme ECA-MAC

Dans cette section, nous avons l'intention de résoudre deux problèmes difficiles liés au contrôle de l'accès au support. Dans un premier temps, nous avons visé à différencier les nœuds réseau afin de donner plus de chance aux nœuds prioritaires d'accéder rapidement au canal de transmission. Dans un second temps, nous avons visé à réduire les collisions dues au temps de latence aléatoire pendant lequel les nœuds du réseau attendent avant de transmettre leurs données.

Dans cette contribution, nous avons conçu l'algorithme ECA-MAC pour assurer une bonne (QoS) en termes de la consommation d'énergie, de la latence et de PDR. ECA-MAC permet de différencier l'accès au support en fonction du niveau d'énergie des nœuds. Les nœuds ayant un niveau d'énergie faible ont plus de chances d'accéder au support et d'envoyer leurs données dès la première tentative. Pour atteindre l'objectif de différenciation des nœuds, l'algorithme ECA-MAC considère trois niveaux de priorité; le niveau le plus élevé concerne les nœuds dont le niveau d'énergie est inférieur à $2/3$ du niveau total de la batterie, ce qui leur permettrait de gagner la contention rapidement avant que leur batterie ne s'épuise et donc perdre de données qui pourraient être sensibles. Le niveau le plus bas de priorité inclut les nœuds dont le niveau d'énergie est supérieur à $1/3$ du niveau total de la batterie, ce type de nœuds n'est pas soumis à une contrainte d'énergie, en conséquence, ces nœuds n'ont pas de problème d'attendre plus de temps avant d'envoyer leurs données. Tandis que, le niveau moyen concerne les nœuds dont le niveau d'énergie est compris entre $1/3$ et $2/3$ du niveau total de la batterie.

Avec ce mécanisme, nous avons segmenté le domaine de collision en trois sous domaines. Les nœuds appartenant au même intervalle de priorité peuvent avoir des collisions, ce qui peut réduire les performances du réseau. Pour faire face à ce problème, notre algorithme assure des plages aléatoires à partir desquelles un nœud peut choisir son temps de backoff.

L'algorithme ECA-MAC fonctionne en deux étapes :

- Lors de la première étape, Un nœud définit le niveau de priorité en fonction de son niveau de la batterie. Selon cette priorité, il choisit la fenêtre de contention (CW) à partir de laquelle il est autorisé à obtenir son temps de backoff. Ainsi, afin de donner plus de chances au nœud ayant un niveau de priorité élevé (niveau de batterie faible) et de différencier la priorité d'accès au support, nous définissons trois plages en fonction de la priorité des nœuds. La plage $[0, CW_{PR1}]$ est utilisée par les nœuds ayant un niveau de priorité élevé. La plage $[CW_{PR2}, CW_{PR3}]$ comprend les nœuds de faible priorité. Alors que $]CW_{PR1}, CW_{PR2}[$ concerne les nœuds de niveau moyen.
- Dans la deuxième étape, nous nous concentrons sur le problème d'évitement des collisions. L'algorithme ECA-MAC permet aux nœuds de choisir de manière aléatoire des mini-intervalles à partir desquels ils sont autorisés à obtenir leur temps de backoff avant

d'avoir accès au canal de transmission. Pour plus de compréhension voir la figure 4.2.

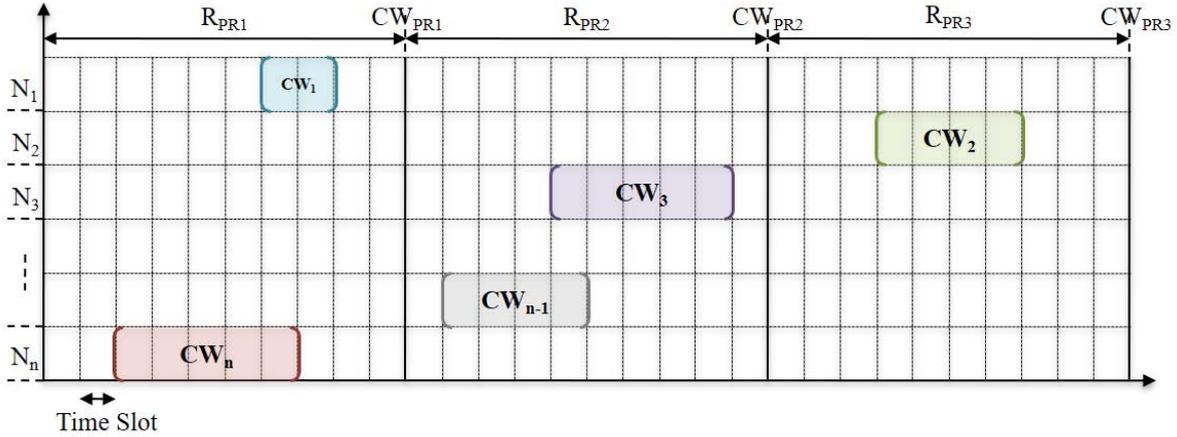


Figure 4.2 – MÉCANISME DE LA FENÊTRE DE CONTENTION DE L'ALGORITHME ECA-MAC

La figure 4.2 décrit la manière dont les nœuds peuvent obtenir leur temps de backoff pour accéder au support de transmission. Les nœuds \$N_2\$ et \$N_n\$ ont tous les deux un niveau de priorité élevé. Ils choisissent au début une fenêtre de contention \$CW\$ de manière aléatoire à partir de la première plage destinée aux priorités de niveau le plus élevé (\$RPr1 = [0, CW_{Pr1}]\$). Après avoir sélectionné au hasard les mini-intervalles \$CW_2, CW_n\$ par \$N_2\$ et \$N_n\$ respectivement, ils définissent leur temps de backoff en fonction de l'équation 4.1. Où (Time Slot Period (TSP)) désigne la période d'un slot de temps.

$$Backoff_T = (random([CW_i])) * TSP \quad (4.1)$$

L'algorithme ECA-MAC considère la fenêtre de contention \$CW\$ comme une séquence binaire \$Pr_i\$ du nœud \$i\$ (voir l'équation 4.2) :

$$Pr_i = 0^m 1^n 0^k = N \quad (4.2)$$

Où \$N\$ est la longueur de la séquence binaire \$Pr_i\$ qui dépend du nombre de slots de temps utilisés par chaque plage de priorité (la longueur de \$RPr_1\$, ou \$RPr_2\$ ou celle de \$RPr_3\$). Les paramètres \$m, n\$ et \$k\$ désignent le nombre de répétitions de 0, 1 et 0 respectivement. L'état 0 signifie que les nœuds ne sont pas autorisés à utiliser ce slot de temps. Alors que l'état 1 signifie que les nœuds peuvent utiliser ce slot de temps pour le processus de backoff avant de transmettre leurs données. Le paramètre \$m\$ est choisie entre \$[0, N/2]\$; car nous devrions laisser aux nœuds suffisamment d'espace pour choisir leur chaîne du bit 1. Le paramètre \$n\$ appartient à l'intervalle \$[1, N - m]\$. Tandis que le paramètre \$k\$ est calculé selon l'équation suivante ; \$n + m + k = N\$. Ainsi, la \$CW\$ de chaque nœud est spécifiée par la séquence du bit 1 ; \$CW_i = [1n]\$ et délimité par \$[0^m]\$ et \$[0^k]\$. La figure 4.3 décrit le processus de l'algorithme ECA-MAC qui comprend trois phases principales.

4.3.3 RÉSULTATS DE LA SIMULATION

Nous validons les performances du protocole ECA-MAC par simulation sur le simulateur de réseau NS2 [93], considéré comme le simulateur le plus utilisé pour évaluer les protocoles WSN. Les résultats sont comparés à ceux du protocole S-MAC, lequel protocole ECA-MAC a été mis

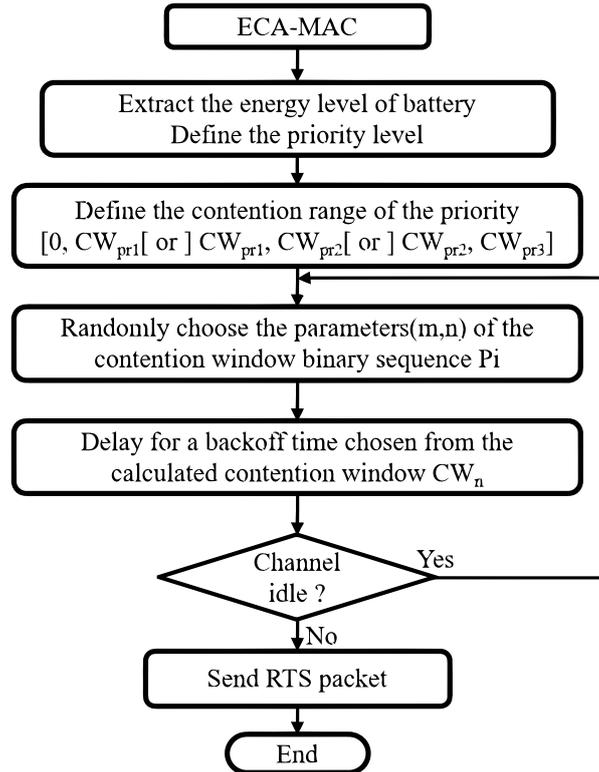


Figure 4.3 – DIAGRAMME DE L’ALGORITHME ECA-MAC

en œuvre en utilisant ses rôles de synchronisation.

Pour valider le protocole ECA-MAC, nous avons l’implémenté dans le simulateur NS2, nous comparons ses performances avec celles du protocole S-MAC à la base duquel notre algorithme a été implémenté en utilisant ses principes de synchronisation.

Dans cette partie, nous abordons les performances des réseaux multi-usages dans des scénarios multi-sauts. Notre topologie consiste donc en 10 sauts entre le nœud source et la destination. Le premier nœud est considéré comme le nœud source qui génère des charges du trafic modélisées par le trafic exponentiel ON/OFF. De plus, pour évaluer uniquement le comportement de la couche MAC, nous utilisons un protocole de routage statique (NO Ad-Hoc Routing Agent (NOAH) [137]). Tous les résultats sont obtenus à partir de 30 simulations. Les paramètres de simulations sont résumés dans le tableau 4.1.

Dans cette section, nous présenterons l’évaluation ECA-MAC dans deux scénarios. Pour voir l’effet du nombre de nœuds et le nombre de sauts entre la source et la destination sur le comportement de l’algorithme ECA-MAC, nous allons varier ce dernier entre la source et la destination de 1 saut à 10 sauts. Dans ce scénario, nous utiliserons une charge de trafic exponentiel généré par la source. Dans le deuxième scénario, nous définirons le nombre de sauts entre la source et la destination à 10 sauts, et nous ferons varier la charge de trafic généré par le nœud source (variation du temps d’inter-arrivée des paquets de 0.5 à 5 secondes). Dans les deux scénarios, nous évaluerons la latence moyenne, la consommation d’énergie et le taux de paquets délivrés.

Tableau 4.1 – PARAMÈTRES DE SIMULATION

| Paramètres | Valeurs |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Données de la couche application | Exponential traffic |
| Temps moyen de rafale | $1/\mu = 1/500$ (ms) |
| Temps moyen de veille | $1/\lambda = 1/500$ (ms) |
| Mode de propagation | Two-Ray-Ground |
| Protocole de routage | NOAH |
| Nombre de sauts | 10 |
| Taille de paquet de donnée | 80 B |
| Consommation en mode veille | 14.4 (mW) |
| Consommation en mode transmission | 36.0 (mW) |
| Consommation en mode endormi | 0.015 (mW) |
| Duty-cycle | 10% |
| Taille d'une trame | 1603 (ms) |
| Taille de la periode de veille | 1442.8 (ms) |

4.3.3.1 L'évaluation de la latence

Dans cette sous-section, nous montrerons l'effet de notre algorithme sur le comportement du réseau en termes de la latence moyenne. Sur la figure 4.4, nous observons que lorsque le nombre de sauts entre le nœud de destination et le nœud source atteint 4 sauts, l'algorithme ECA-MAC surpasse le protocole S-MAC. En effet, lorsque le nombre de nœuds dans le réseau augmente, la probabilité d'avoir plus de nœuds en contention sur le support est élevée, ce qui peut provoquer davantage de collisions. Alors que, dans le protocole ECA-MAC, nous pouvons traiter ce problème en utilisant différentes fenêtres de contention CW. Et ainsi, cela garantit qu'un seul nœud aura accès au support. De plus, nous remarquons la différence entre les résultats de notre algorithme et ceux du protocole S-MAC, car ECA-MAC offre plus de chances aux nœuds ayant une faible énergie de pendre le premier intervalle de contention.

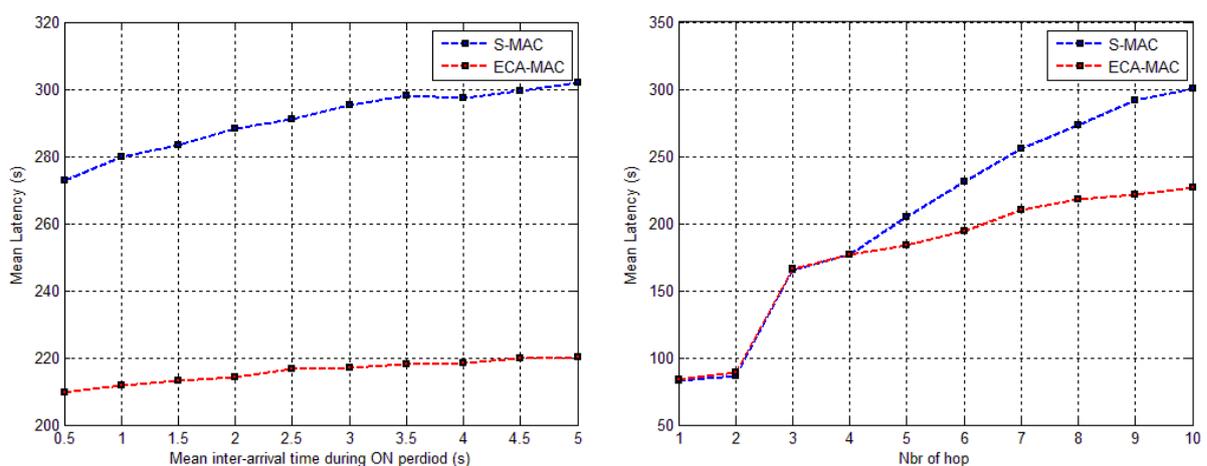


Figure 4.4 – RÉSULTATS DE LE LATENCE

4.3.3.2 L'évaluation de l'énergie

Le protocole MAC est considéré comme le protocole clé responsable de la réduction de la consommation d'énergie des nœuds capteurs. Ici, nous évaluons la consommation d'énergie en calculant la moyenne de la consommation d'énergie par octet dans tous les nœuds de réseau déployé. La figure 4.5 nous montre qu'il existe une différence significative entre les deux courbes lorsque nous augmentons la charge de trafic ou le nombre de sauts. D'après ces résultats, nous pouvons dire que même si nous diminuons le temps inter-arrivée du paquet, la consommation d'énergie reste presque la même et offre donc un coût énergétique moindre par octet. Ces résultats prouvent l'impact du protocole ECA-MAC sur l'énergie consommée des nœuds capteurs.

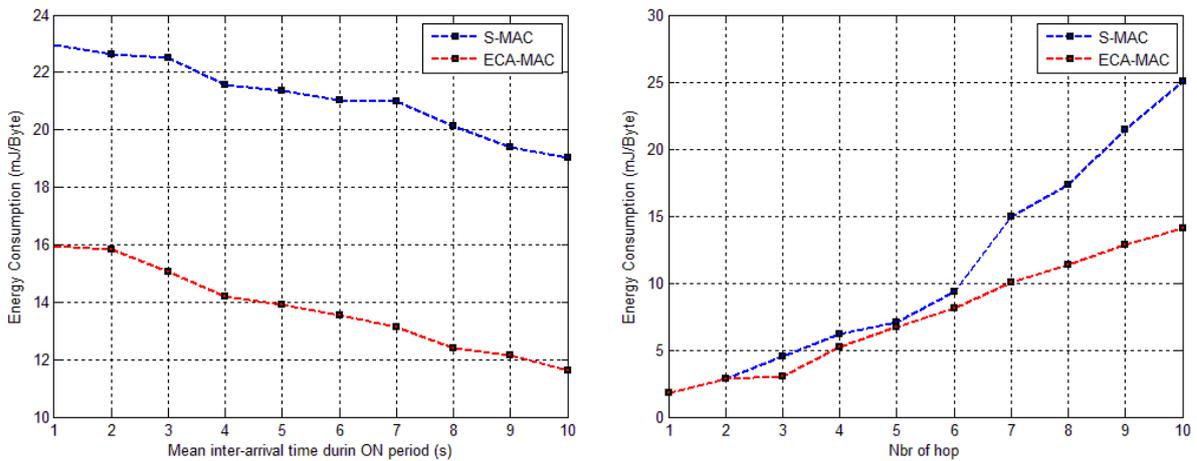


Figure 4.5 – RÉSULTATS DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

4.3.3.3 L'évaluation de PDR

Dans cette simulation, nous calculons le PDR atteint par tous les nœuds du réseau. Sur la figure 4.6, nous notons que l'algorithme ECA-MAC surpasse le protocole S-MAC à partir de 3 sauts. Le PDR montre l'efficacité de notre solution en termes d'accès au canal de transmission. Les résultats illustrés à la figure 4.6 ont été prouvés par le nombre réduit de collisions, car nous réduisons le nombre de nœuds prévus sur le support pour envoyer plus de données efficacement. En outre, nous notons que même si nous augmentons la charge de trafic dans le réseau, le PDR obtenu par l'algorithme ECA-MAC reste meilleur que le PDR obtenu par le protocole S-MAC.

4.4 Conclusions

Gérer la QoS faisait partie des limitations dont souffre la plupart des protocoles MAC. Afin de surmonter les limites du protocole S-MAC, nous avons abordé les problèmes liés aux RCSF polyvalents. Le premier problème concernait la façon de contrôler l'accès au support de transmission, de manière à réduire le temps de latence des données appartenant aux nœuds prioritaire. Ainsi, une nouvelle approche d'accès au support, appelée ECA-MAC, a été présentée. Cet algorithme vise à améliorer la qualité de service des RCSF déployés pour des réseaux hétérogènes, en termes de la consommation énergétique, la latence et le PRD. Notre méthode prend en compte la priorité du nœud capteur dans le processus d'accès au support. L'efficacité de cet algorithme a été prouvée par les résultats obtenus dans les cas de faibles et fortes charges de trafic. Les

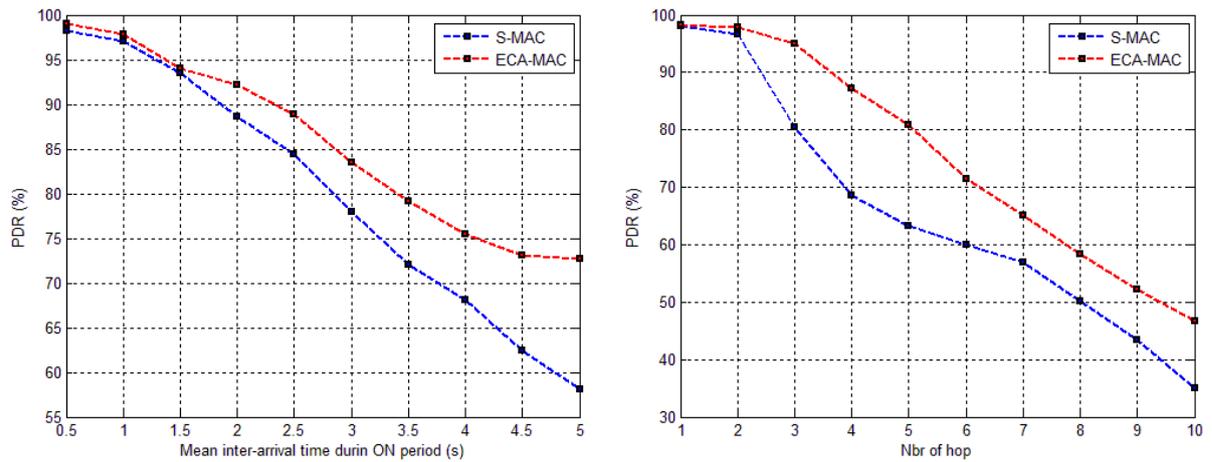


Figure 4.6 – RÉSULTATS DE PDR

simulations ont confirmé que, grâce à l'algorithme ECA-MAC, nous sommes en mesure d'améliorer la PDR, de réduire le temps de latence et de prolonger la durée de vie des nœuds capteurs. Les fenêtres de contention disjointes constituaient une grande force qui permettait de réduire les collisions et d'améliorer la qualité de service du réseau. Cependant, l'inconvénient de cette idée est qu'elle pénalise les nœuds ayant de faible priorité quand aucun autre nœud n'est en compétition pour gagner l'accès au support de transmission.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Sommaire

| | | |
|-----|--------------------------|----|
| 5.1 | Conclusions | 75 |
| 5.2 | Travaux futurs | 76 |

5.1 Conclusions

Les RCSF ont récemment vu un emploi exponentiel dans différents domaines de notre vie quotidienne en raison de leur adaptabilité potentielle avec différents environnements. Cependant, ces réseaux sont confrontés à des défis de conception importants en raison de leurs capacités de stockage, de traitement et principalement de leur manque de ressources énergétiques. L'énergie est une ressource critique et constitue souvent le principal obstacle au déploiement de RCSF dans différentes applications. Ainsi, tout protocole de communication de n'importe quelle couche doit prendre en considération cette contrainte.

L'objectif principal de Notre thèse était de traiter le problème de l'efficacité de la couche MAC dans les RCSF événementiels et polyvalents. Pour comprendre efficacement nos contributions, nous avons d'abord fourni le contexte général de notre thèse. Nous avons étudié le contexte de l'environnement de RCSF et les motivations derrière nos choix. Nous avons ensuite présenté une étude détaillée des protocoles MAC déterministes les plus pertinents proposés dans la littérature. L'un des concepts les plus utilisés qui ont inspiré nos travaux est le mécanisme fondé sur le duty-cycle. Cela consiste essentiellement à alterner périodiquement l'émetteur-récepteur entre le mode actif et le mode veille. En fait, cette approche est économe en énergie, flexible, facile à utiliser dans différentes topologies des RCSF.

Dans la première contribution de cette thèse, nous avons proposé le protocole KF-MAC qui vise à améliorer les performances des RCSF caractérisés par un trafic périodique ou événementiel. Ce dernier est caractérisé par des charges de trafic élevées, où l'événement peut survenir soudainement de temps en temps. Cependant, il devrait être immédiatement relayé à la station de base afin de réagir le plus vite possible. Pour faire face à ce problème, nous avons proposé d'adapter le comportement de l'émetteur-récepteur à celui des charges de trafic en rafale en utilisant le filtre de prédiction Kalman. Des simulations approfondies comparant KF-MAC à la norme IEEE 802.15.4 et au protocole S-MAC ont montré l'efficacité des protocoles proposés dans plusieurs scénarios en ce qui concerne la latence, le PDR et la consommation d'énergie. Dans le même chapitre, nous avons présenté la deuxième contribution de notre thèse, qui a deux objectifs à traiter afin d'améliorer les performances de réseau. Le premier est l'amélioration de la prolongation de la durée de vie des nœuds capteurs. Le second objectif consiste à améliorer le PDR sans introduire un temps de latence critique. Le protocole AD-MAC vise à contrôler l'émetteur-récepteur des nœuds en se basant sur les charges de trafic circulant dans le réseau.

AD-MAC active l'émetteur-récepteur seulement si le nœud a probablement des données à recevoir. Les simulations ont montré l'efficacité du protocole AD-MAC en termes de PDR et de la préservation d'énergie.

Le chapitre 4 a été consacré aux problèmes liés à la différenciation des services. Dans ce chapitre nous avons présenté une contribution, appelée algorithme ECA-MAC, qui visait à améliorer les performances de RCSF hétérogènes. Dans ces réseaux, les protocoles de communication doivent traiter différents types de charges de trafic circulant dans le même réseau. Généralement, il se compose de deux ou trois types de nœuds, en fonction des besoins de l'application. Dans cette contribution, nous avons proposé de différencier l'accès au support en fonction de niveau d'énergie des nœuds. Les nœuds ayant un niveau d'énergie plus faible ont plus de chances d'accéder au support dès la première tentative. L'algorithme ECA-MAC nous a permis d'améliorer la PDR grâce aux différentes fenêtres de contention qui permettaient de réduire les collisions et d'améliorer la qualité de service du réseau.

5.2 Travaux futurs

Les travaux que nous avons réalisés dans cette thèse nous ouvrent de nombreux axes de recherche :

- Dans cette thèse, nous avons essayé d'améliorer les fonctionnalités de la couche MAC à partir de deux visions ; le contrôle de l'accès au support et la gestion de l'émetteur-récepteur. La première et la deuxième contribution présentées visent principalement à adapter les modes d'activité de l'émetteur-récepteur au trafic circulant dans le réseau. Cependant, dans ces protocoles, nous pouvons également améliorer la manière dont les nœuds ont accès au support. À cet égard, nous voyons que nous pouvons éviter les collisions dans ce protocole en utilisant des fenêtres de contention aléatoires (à partir desquelles les nœuds choisissent leurs temps de backoff). De cette manière, le nœud choisira d'abord sa fenêtre de contention, puis à partir de cette fenêtre, il pourra attendre pendant un certain temps avant de pouvoir accéder au support et envoyer ses données. En outre, le test des protocoles KF-MAC et AD-MAC dans d'autres déploiements de réseaux de capteurs et dans divers environnements peut rendre l'étude expérimentale encore plus enrichissante.
- Dans le chapitre précédent, nous avons présenté l'algorithme ECA-MAC, qui concerne principalement les applications polyvalentes. Ce travail a été mis en œuvre dans le protocole S-MAC. Nos résultats doivent être renforcés par de réelles expériences. Sur la base de ce fait, notre prochaine étape consiste à implémenter cet algorithme dans des capteurs réels, tels que *MicaZ* [138].
- Au cours de nos études sur une grande diversité de protocoles MAC, nous avons constaté la nécessité de disposer d'informations de routage. Ces informations peuvent contribuer à créer un protocole robuste en ce qui concerne la manière avec laquelle les nœuds peuvent adapter leurs modes de veille en fonction du temps de relais. Pour cette raison, nous avons l'intention d'adopter une approche multicouche combinant les couches MAC et réseau.



LISTE DES PUBLICATIONS

Revues internationales :

IALA Imad, DBIBIH Imane, ZYTOUNE Ouadoudi, RZIZA Mohammed, and ABOUTAJDINE Driss. « A Kalman Filter Process for Energy Optimization in WSNs. », *Journal of Communications Software and Systems*. 2019. Vol. 15, no. 1.

IALA Imad, DBIBIH Imane, and ZYTOUNE Ouadoudi. « Adaptive Duty-Cycle Scheme Based on a New Prediction Mechanism for Energy Optimization over IEEE 802.15.4 Wireless Network », *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*. 2018, Vol. 11, p. 105–113.

Conférences internationales :

IALA Imad, OUADOU Mourad, ZYTOUNE Ouadoudi, and ABOUTAJDINE Driss. « Energy based collision avoidance at the MAC layer for wireless sensor network ». *International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*. IEEE, 2017. p. 1-5.

IALA Imad, DBIBIH Imane, ZYTOUNE Ouadoudi, and ABOUTAJDINE Driss. « Collision avoidance and service differentiation at the MAC layer of WSN designed for multi-purpose applications ». *2nd International Conference on Cloud Computing Technologies and Applications (CloudTech)*. IEEE, 2016. p. 277-282.

DBIBIH Imane, **IALA Imad**, ZYTOUNE Ouadoudi, and ABOUTAJDINE Drisse. « ASS-MAC : Adaptive sleeping sensor MAC protocol designed for wireless sensor networks ». *International Conference on Information Technology for Organizations Development (IT4OD)*. IEEE, 2016. p. 1-5.

DBIBIH Imane, **IALA Imad**, ZYTOUNE Ouadoudi, and ABOUTAJDINE Drisse. « Message Priority CSMA/CA Algorithm for Critical-Time Wireless Sensor Networks ». *Proceedings of the Mediterranean Conference on Information & Communication Technologies (MedICT)*. Springer, Cham, 2016. p. 265-274.

IALA Imad, DBIBIH Imane, ZYTOUNE Ouadoudi, and ABOUTAJDINE Driss. « Service differentiation based medium access control protocol for real-time application ». *Third World Conference on Complex Systems (WCCS)*. IEEE, 2015. p. 1-5.



BIBLIOGRAPHIE

- [1] Qinghua Wang and Ilangko Balasingham. Wireless sensor networks-an introduction. In *Wireless Sensor Networks : Application-Centric Design*. InTech, 2010.
- [2] Charles Perkins. Ad hoc networks. 2000.
- [3] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer networks*, 38(4) :393–422, 2002.
- [4] Ian F Akyildiz, Tommaso Melodia, and Kaushik R Chowdhury. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer networks*, 51(4) :921–960, 2007.
- [5] Gregory J Pottie and William J Kaiser. Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43(5) :51–58, 2000.
- [6] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE communications magazine*, 40(8) :102–114, 2002.
- [7] Hairong Qi, Yingyue Xu, and Xiaoling Wang. Mobile-agent-based collaborative signal and information processing in sensor networks. *Proceedings of the IEEE*, 91(8) :1172–1183, 2003.
- [8] Ben L Titzer and Jens Palsberg. Nonintrusive precision instrumentation of micro-controller software. In *ACM SIGPLAN Notices*, volume 40, pages 59–68. ACM, 2005.
- [9] Iuliu Vasilescu, Keith Kotay, Daniela Rus, Matthew Dunbabin, and Peter Corke. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network. In *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 154–165. ACM, 2005.
- [10] Volkan Rodoplu and Min Kyoung Park. An energy-efficient mac protocol for underwater wireless acoustic networks. In *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*, pages 1198–1203. IEEE, 2005.
- [11] Jerome Peter Lynch, Arvind Sundararajan, Kincho H Law, Anne S Kiremidjian, and Ed Carryer. Embedding damage detection algorithms in a wireless sensing unit for operational power efficiency. *Smart Materials and Structures*, 13(4) :800, 2004.
- [12] Herzel Yamin Thomas Dittrich, Chen Menachem and Lou Adams. Lithium batteries for wireless sensor networks. Technical report, 2008.

- [13] Holger Karl and Andreas Willig. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2007.
- [14] Bernhard Buchli, Felix Sutton, and Jan Beutel. Gps-equipped wireless sensor network node for high-accuracy positioning applications. In *European Conference on Wireless Sensor Networks*, pages 179–195. Springer, 2012.
- [15] Zhi Ang Eu, Hwee-Pink Tan, and Winston KG Seah. Design and performance analysis of mac schemes for wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting. *Ad Hoc Networks*, 9(3) :300–323, 2011.
- [16] Winston KG Seah, Zhi Ang Eu, and Hwee-Pink Tan. Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (wsn-heap)-survey and challenges. In *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009. 1st International Conference on*, pages 1–5. Ieee, 2009.
- [17] John A Stankovic, TE Abdelzaher, Chenyang Lu, Lui Sha, and Jennifer C Hou. Real-time communication and coordination in embedded sensor networks. *Proceedings of the IEEE*, 91(7) :1002–1022, 2003.
- [18] Milica Pejanović ■urišić, Zhilbert Tafa, Goran Dimić, and Veljko Milutinović. A survey of military applications of wireless sensor networks. In *Embedded Computing (MECO), 2012 Mediterranean Conference on*, pages 196–199. IEEE, 2012.
- [19] Pedro Cheong, Ka-Fai Chang, Ying-Hoi Lai, Sut-Kam Ho, Iam-Keong Sou, and Kam-Weng Tam. A zigbee-based wireless sensor network node for ultraviolet detection of flame. *IEEE transactions on industrial electronics*, 58(11) :5271–5277, 2011.
- [20] Hande Alemdar and Cem Ersoy. Wireless sensor networks for healthcare : A survey. *Computer networks*, 54(15) :2688–2710, 2010.
- [21] Pengyu Wang, Hui Hou, Xiongfai He, Chengzhi Wang, Tianqi Xu, and Yan Li. Survey on application of wireless sensor network in smart grid. *Procedia Computer Science*, 52 :1212–1217, 2015.
- [22] V Çağrı Güngör and Gerhard P Hancke. *Industrial wireless sensor networks : Applications, protocols, and standards*. Crc Press, 2013.
- [23] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, and Dipak Ghosal. Wireless sensor network survey. *Computer networks*, 52(12) :2292–2330, 2008.
- [24] Abu Zafar Abbasi, Noman Islam, Zubair Ahmed Shaikh, et al. A review of wireless sensors and networks’ applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 36(2) :263–270, 2014.
- [25] Bushra Rashid and Mubashir Husain Rehmani. Applications of wireless sensor networks for urban areas : A survey. *Journal of network and computer applications*, 60 :192–219, 2016.
- [26] Hui Wang, Nazim Agoulmine, Maode Ma, and Yanliang Jin. Network lifetime optimization in wireless sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 28(7), 2010.

-
- [27] Jun Zheng and Abbas Jamalipour. *Wireless sensor networks : a networking perspective*. John Wiley & Sons, 2009.
- [28] Jason Hill, Mike Horton, Ralph Kling, Lakshman Krishnamurthy, and Lakshman Krishnamurthy. The platforms enabling wireless sensor networks. *Communications of the ACM*, 47(6) :41–46, 2004.
- [29] Spec. Spec specification. http://www.jlhlabs.com/jhill_cs/spec/index.htm. accessed : 2018.
- [30] intel. Imote specification. <http://www.intel.com/research/exploratory/motes.htm>. accessed : 2018.
- [31] bluetooth. Specification of the bluetooth system. <http://www.bluetooth.org/>. accessed : 2018.
- [32] Gurwinder Kaur and Rachit Mohan Garg. Energy efficient topologies for wireless sensor networks. *International Journal of Distributed and Parallel Systems*, 3(5) :179, 2012.
- [33] Antoine Gallais, Jean Carle, David Simplot-Ryl, and Ivan Stojmenović. Localized sensor area coverage with low communication overhead. *IEEE transactions on mobile computing*, 7(5), 2008.
- [34] Sandeep S Kulkarni. Tdma service for sensor networks. In *Distributed Computing Systems Workshops, 2004. Proceedings. 24th International Conference on*, pages 604–609. IEEE, 2004.
- [35] Sameer Tilak, Nael B Abu-Ghazaleh, and Wendi Heinzelman. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(2) :28–36, 2002.
- [36] Junguo Zhang, Wenbin Li, Ning Han, and Jiangming Kan. Forest fire detection system based on a zigbee wireless sensor network. *Frontiers of Forestry in China*, 3(3) :369–374, 2008.
- [37] Wei Mo, Daji Qiao, and Zhengdao Wang. Mostly-sleeping wireless sensor networks : Connectivity, k-coverage, and α -lifetime. In *Proceedings of the 43rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, pages 1–10, 2005.
- [38] Manish Bhardwaj and Anantha P Chandrakasan. Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments. In *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1587–1596. IEEE, 2002.
- [39] Honghai Zhang and Jennifer C Hou. Maximising α -lifetime for wireless sensor networks. *International Journal of Sensor Networks*, 1(1-2) :64–71, 2006.
- [40] Bogdan Cărbunar, Ananth Grama, Jan Vitek, and Octavian Cărbunar. Redundancy and coverage detection in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 2(1) :94–128, 2006.
- [41] Carla-Fabiana Chiasserini, Imrich Chlamtac, Paolo Monti, and Antonio Nucci. Energy efficient design of wireless ad hoc networks. In *International Conference on Research in Networking*, pages 376–386. Springer, 2002.

- [42] Arvind Giridhar and PR Kumar. Maximizing the functional lifetime of sensor networks. In *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, page 2. IEEE Press, 2005.
- [43] Keith Hellman and Michael Colagrosso. Investigating a wireless sensor network optimal lifetime solution for linear topologies. *Journal of Interconnection Networks*, 7(01) :91–99, 2006.
- [44] Di Tian and Nicolas D Georganas. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 32–41. ACM, 2002.
- [45] Stanislava Soro and Wendi B Heinzelman. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering. In *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2005. Proceedings. 19th IEEE International*, pages 8–pp. IEEE, 2005.
- [46] Isabel Dietrich and Falko Dressler. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 5(1) :5, 2009.
- [47] Santosh Kumar, Anish Arora, and Ten-Hwang Lai. On the lifetime analysis of always-on wireless sensor network applications. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE International Conference on*, pages 3–pp. IEEE, 2005.
- [48] Vijay Raghunathan, Saurabh Ganeriwal, and Mani Srivastava. Emerging techniques for long lived wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 44(4) :108–114, 2006.
- [49] Dermot Diamond. Energy consumption issues in chemo/biosensing using wsns. In *Energy and Materials : Critical Issues for Wireless Sensor Networks Workshop*, 2006.
- [50] Gyula Simon, Miklós Maróti, Ákos Lédeczi, György Balogh, Branislav Kusy, András Nádas, Gábor Pap, János Sallai, and Ken Frampton. Sensor network-based countersniper system. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 1–12. ACM, 2004.
- [51] Geoffrey Werner-Allen, Konrad Lorincz, Mario Ruiz, Omar Marcillo, Jeff Johnson, Jonathan Lees, and Matt Welsh. Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE internet computing*, 10(2) :18–25, 2006.
- [52] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, and Andrea Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks : A survey. *Ad hoc networks*, 7(3) :537–568, 2009.
- [53] Andrea Prati, Roberto Vezzani, Luca Benini, Elisabetta Farella, and Piero Zappi. An integrated multi-modal sensor network for video surveillance. In *Proceedings of the third ACM international workshop on Video surveillance & sensor networks*, pages 95–102. ACM, 2005.
- [54] Eduardo F Nakamura, Antonio AF Loureiro, and Alejandro C Frery. Information fusion for wireless sensor networks : Methods, models, and classifications. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 39(3) :9, 2007.

-
- [55] Kazem Sohraby, Daniel Minoli, and Taieb Znati. *Wireless sensor networks : technology, protocols, and applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [56] Giacomo De Meulenaer, François Gosset, François-Xavier Standaert, and Olivier Pereira. On the energy cost of communication and cryptography in wireless sensor networks. In *Networking and Communications, 2008. WIMOB'08. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing,*, pages 580–585. IEEE, 2008.
- [57] Jason Hill, Robert Szewczyk, Alec Woo, Seth Hollar, David Culler, and Kristofer Pister. System architecture directions for networked sensors. *ACM SIGOPS operating systems review*, 34(5) :93–104, 2000.
- [58] Angelo Brayner, Aretusa Lopes, Diorgens Meira, Ricardo Vasconcelos, and Ronaldo Menezes. Toward adaptive query processing in wireless sensor networks. *Signal Processing*, 87(12) :2911–2933, 2007.
- [59] Rahim Kacimi, Riadh Dhaou, and A-L Beylot. Energy-aware self-organization algorithms for wireless sensor networks. In *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE*, pages 1–5. IEEE, 2008.
- [60] Tmote. Tmote sky specification. <http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>. accessed : 2016.
- [61] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 95–107. ACM, 2004.
- [62] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, 12(3) :493–506, 2004.
- [63] Gang Lu, Bhaskar Krishnamachari, and Cauligi S Raghavendra. An adaptive energy-efficient and low-latency mac for data gathering in wireless sensor networks. In *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004. Proceedings. 18th International*, page 224. IEEE, 2004.
- [64] Jing Li and Georgios Y Lazarou. A bit-map-assisted energy-efficient mac scheme for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks*, pages 55–60. ACM, 2004.
- [65] Venkatesh Rajendran, Katia Obraczka, and Jose Joaquin Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. *Wireless networks*, 12(1) :63–78, 2006.
- [66] Injong Rhee, Ajit Warrier, Mahesh Aia, Jeongki Min, and Mihail L Sichitiu. Z-mac : a hybrid mac for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 16(3) :511–524, 2008.
- [67] Paolo Santi. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM computing surveys (CSUR)*, 37(2) :164–194, 2005.
- [68] Ya Xu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 70–84. ACM, 2001.

- [69] Farinaz Koushanfar, Nina Taft, and Miodrag Potkonjak. Sleeping coordination for comprehensive sensing using isotonic regression and domatic partitions. 2006.
- [70] Benjie Chen, Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan, and Robert Morris. Span : An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. *Wireless networks*, 8(5) :481–494, 2002.
- [71] Mehmet C Vuran, Özgür B Akan, and Ian F Akyildiz. Spatio-temporal correlation : theory and applications for wireless sensor networks. *Computer Networks*, 45(3) :245–259, 2004.
- [72] Min Wu and Chang Wen Chen. Multiple bit stream image transmission over wireless sensor networks. *Sensor Network Operations*, pages 677–687, 2006.
- [73] Leonard Kleinrock and Fouad Tobagi. Packet switching in radio channels : Part i—carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics. *IEEE transactions on Communications*, 23(12) :1400–1416, 1975.
- [74] LAN/MAN Standards Committee et al. Part 15.4 : wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low-rate wireless personal area networks (lr-wpans). *IEEE Computer Society*, 2003.
- [75] Ke-yin Jin, Yao Zhang, and De-run Tian. Based on the improvement of leach protocol for wireless sensor network routing algorithm. In *Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), 2012 Second International Conference on*, pages 1525–1528. IEEE, 2012.
- [76] Hairong Qi, Phani Teja Kuruganti, and Yingyue Xu. The development of localized algorithms in wireless sensor networks. *Sensors*, 2(7) :286–293, 2002.
- [77] Arshad Shaikh, Danish Vasan, and Khalid H Mohammadani. Performance analysis of manet routing protocols—a comparative study. *International Journal of Computer Applications*, 83(7), 2013.
- [78] Venkatesh Rajendran, Katia Obraczka, and Jose Joaquin Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. *Wireless networks*, 12(1) :63–78, 2006.
- [79] Katayoun Sohrabi, Jay Gao, Vishal Ailawadhi, and Gregory J Pottie. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE personal communications*, 7(5) :16–27, 2000.
- [80] Peng Cheng, Fan Zhang, Jiming Chen, Youxian Sun, and Xuemin Shen. A distributed tdma scheduling algorithm for target tracking in ultrasonic sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(9) :3836–3845, 2013.
- [81] Liqi Shi and Abraham O Fapojuwo. Tdma scheduling with optimized energy efficiency and minimum delay in clustered wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 9(7) :927–940, 2010.
- [82] Wei Ye, Fabio Silva, and John Heidemann. Ultra-low duty cycle mac with scheduled channel polling. In *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 321–334. ACM, 2006.

-
- [83] Venkatesh Rajendran, Katia Obraczka, and Jose Joaquin Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. *Wireless networks*, 12(1) :63–78, 2006.
- [84] Venkatesh Rajendran, Jose Joaquin Garcia-Luna-Aceves, and Katia Obraczka. Energy-efficient, application-aware medium access for sensor networks. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE International Conference on*, pages 8–pp. IEEE, 2005.
- [85] L Van Hoesel and P Havinga. A lightweight medium access protocol (lmac) for wireless sensor networks. In *1st Int. Workshop on Networked Sensing Systems (INSS 2004)*, 2004.
- [86] Supriyo Chatterjea, LFW Van Hoesel, and Paul JM Havinga. Ai-lmac : an adaptive, information-centric and lightweight mac protocol for wireless sensor networks. In *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference, 2004. Proceedings of the 2004*, pages 381–388. IEEE, 2004.
- [87] Ozlem Durmaz Incel, Lodewijk Van Hoesel, Pierre Jansen, and Paul Havinga. Mc-lmac : A multi-channel mac protocol for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 9(1) :73–94, 2011.
- [88] Katayoun Sohrabi, Jay Gao, Vishal Ailawadhi, and Gregory J Pottie. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE personal communications*, 7(5) :16–27, 2000.
- [89] Katayoun Sohrabi and Gregory J Pottie. Performance of a novel self-organization protocol for wireless ad-hoc sensor networks. In *Vehicular Technology Conference, 1999. VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th*, volume 2, pages 1222–1226. IEEE, 1999.
- [90] Tim Nieberg, Stefan Dulman, Paul Havinga, Lodewijk van Hoesel, and Jian Wu. Collaborative algorithms for communication in wireless sensor networks. In *Ambient Intelligence : Impact on Embedded System Design*, pages 271–294. Springer, 2003.
- [91] Gang Lu, Bhaskar Krishnamachari, and Cauligi S Raghavendra. An adaptive energy-efficient and low-latency mac for data gathering in wireless sensor networks. In *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004. Proceedings. 18th International*, page 224. IEEE, 2004.
- [92] Lydia Ray Ramaraju Kalidindi, Rajgopal Kannan, and Sitharama Iyengar. Distributed energy aware mac layer protocol for wireless sensor networks. In *Proc. International Conference on Wireless Networks*, pages 282–286, 2003.
- [93] NS-2. The network simulator 2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Accessed : 2018.
- [94] Opnet. Opnet simulator. <http://www.opnet.com/>. Accessed : 2017.
- [95] Scalable. Scalable network technologies. <http://www.scalable-networks.com>. Accessed : 2016.
- [96] TCL. Tcl programming languag. <https://www.tcl.tk/>. Accessed : 2018.
- [97] Prabal Dutta, Stephen Dawson-Haggerty, Yin Chen, Chieh-Jan Mike Liang, and Andreas Terzis. A-mac : A versatile and efficient receiver-initiated link layer for low-power wireless. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 8(4) :30, 2012.

- [98] Samra Boulfekhar and Mohammed Benmohammed. Synchronous receiver initiated mac protocol for long-lived sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 40(2) :504–516, 2014.
- [99] Chuchu Dong and Fengqi Yu. A prediction-based asynchronous mac protocol for heavy traffic load in wireless sensor networks. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 82 :241–250, 2017.
- [100] Lei Tang, Yanjun Sun, Omer Gurewitz, and David B Johnson. Pw-mac : An energy-efficient predictive-wakeup mac protocol for wireless sensor networks. In *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, pages 1305–1313. IEEE, 2011.
- [101] Yang Peng, Zi Li, Daji Qiao, and Wensheng Zhang. Delay-bounded mac with minimal idle listening for sensor networks. In *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, pages 1314–1322. Citeseer, 2011.
- [102] Ying Qiu, Shining Li, Dongyu Yang, and Zhigang Li. Rwb : An efficient receiver-initiated single-hop broadcast protocol for asynchronous mac in wireless sensor networks. In *Recent Advances in Computer Science and Information Engineering*, pages 261–266. Springer, 2012.
- [103] Hongwei Tang, Caixia Sun, Yongpeng Liu, and Baohua Fan. Low-latency asynchronous duty-cycle mac protocol for burst traffic in wireless sensor networks. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International*, pages 412–417. IEEE, 2013.
- [104] Manish Kumar Jha, Atul Kumar Pandey, Dipankar Pal, and Anand Mohan. An energy-efficient multi-layer mac (ml-mac) protocol for wireless sensor networks. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 65(3) :209–216, 2011.
- [105] Jie Tian, Yi Wang, Xiaoyuan Liang, Guiling Wang, and Yujun Zhang. Wa-mac : A weather adaptive mac protocol in survivability-heterogeneous wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 67 :40–52, 2017.
- [106] Khalil F Ramadan, MI Dessouky, Mohammed Abd-Elnaby, and Fathi E Abd El-Samie. Node-power-based mac protocol with adaptive listening period for wireless sensor networks. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 84 :46–56, 2018.
- [107] Haitao Zhao, Jibo Wei, Nurul I Sarkar, and Shengchun Huang. E-mac : An evolutionary solution for collision avoidance in wireless ad hoc networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 65 :1–11, 2016.
- [108] Renato F Fernandes, Marcelo B de Almeida, and Dennis Brandão. An energy efficient receiver-initiated mac protocol for low-power wsn. *Wireless Personal Communications*, 100(4) :1517–1536, 2018.
- [109] Ananda Kumar Subramanian and Ilango Paramasivam. Prin : a priority-based energy efficient mac protocol for wireless sensor networks varying the sample inter-arrival time. *Wireless Personal Communications*, 92(3) :863–881, 2017.

-
- [110] Ashmi Sinha and Atul Kumar Pandey. An energy-efficient mac protocol for virtual mimo communications in wsns. In *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), 2017 International Conference on*, pages 1419–1423. IEEE, 2017.
- [111] Ashmi Sinha and Atul Kumar Pandey. An energy-efficient mac protocol for virtual mimo communications in wsns. In *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), 2017 International Conference on*, pages 1419–1423. IEEE, 2017.
- [112] Vinu Sundararaj, Selvi Muthukumar, and RS Kumar. An optimal cluster formation based energy efficient dynamic scheduling hybrid mac protocol for heavy traffic load in wireless sensor networks. *Computers & Security*, 77 :277–288, 2018.
- [113] Rakesh Ranjan Swain, Sonali Mishra, Tushar Kanta Samal, and Manas Ranjan Kabat. An energy efficient advertisement based multichannel distributed mac protocol for wireless sensor networks (adv-mmac). *Wireless Personal Communications*, 95(2) :655–682, 2017.
- [114] Md Ibrahim Khalil, Md Abir Hossain, and Imtiaz Ahmed. Duri-mac : A dual channel receiver initiated mac protocol for wireless sensor network (wsn). In *Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), International Conference on*, pages 577–582. IEEE, 2017.
- [115] Rudolph Emil Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*, 82(1) :35–45, 1960.
- [116] Mark Stemm and Randy H Katz. Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices. *IEICE transactions on Communications*, 80(8) :1125–1131, 1997.
- [117] Imane Dbibih, Ouadoudi Zytoune, and Driss Aboutajdine. On/off markov model based energy-delay aware mac protocol for wireless sensor network. *Wireless personal communications*, 78(2) :1143–1155, 2014.
- [118] Yufeng Zhan, Yuanqing Xia, and Mashood Anwar. Gts size adaptation algorithm for ieee 802.15. 4 wireless networks. *Ad Hoc Networks*, 37 :486–498, 2016.
- [119] Francesca Cuomo, Anna Abbagnale, and Emanuele Cipollone. Cross-layer network formation for energy-efficient ieee 802.15. 4/zigbee wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 11(2) :672–686, 2013.
- [120] Taejoon Kim, Il Han Kim, Yanjun Sun, and ZhongYi Jin. Physical layer and medium access control design in energy efficient sensor networks : An overview. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(1) :2–15, 2015.
- [121] Mohammad Hossein Sedighi Gilani, Iman Sarrafi, and Maghsoud Abbaspour. An adaptive csma/tdma hybrid mac for energy and throughput improvement of wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 11(4) :1297–1304, 2013.
- [122] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1567–1576. IEEE, 2002.

- [123] Rodolfo de Paz Alberola and Dirk Pesch. Duty cycle learning algorithm (dcla) for ieee 802.15. 4 beacon-enabled wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 10(4) :664–679, 2012.
- [124] Fayçal Ait Aoudia, Matthieu Gautier, and Olivier Berder. Opwum : Opportunistic mac protocol leveraging wake-up receivers in wsns. *Journal of sensors*, 2016, 2016.
- [125] Joaquim Oller, Ilker Demirkol, Jordi Casademont, Josep Paradells, Gerd Ulrich Gamm, and Leonhard Reindl. Has time come to switch from duty-cycled mac protocols to wake-up radio for wireless sensor networks? *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 24(2) :674–687, 2016.
- [126] Yi-Hua Zhu, Hangyu Lv, Yanyan Li, Ertao Li, and Kaikai Chi. Energy conservation scheme for ieee 802.15. 4 based battery-free wireless sensor networks. In *Networking and Network Applications (NaNA), 2016 International Conference on*, pages 342–348. IEEE, 2016.
- [127] Nirmala Hiremani and Tiptur Gangaraju Basavaraju. An efficient routing protocol adopting enhanced cluster formation technique accompanied by fuzzy logic for maximizing lifetime of wsn. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 9(4) :185–194, 2016.
- [128] Imad Iala, Imane Dbibih, and Ouadoudi Zytoune. Adaptive duty-cycle scheme based on a new prediction mechanism for energy optimization over ieee 802.15. 4 wireless network. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 11(5) :105.
- [129] O Deepa and J Suguna. An optimized qos-based multipath routing protocol for wireless sensor networks. *TIDEE (TERI Information Digest on Energy & Environment)*, 16(3), 2017.
- [130] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, 12(3) :493–506, 2004.
- [131] IEEE Working 802 11 Group. *IEEE standard 802.11. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications*, volume 802. 01 1999.
- [132] Kien Nguyen, Thinh Nguyen, Chua Kee Chaing, and Mehul Motani. A prioritized mac protocol for multihop, event-driven wireless sensor networks. In *Communications and Electronics, 2006. ICCE'06. First International Conference on*, pages 47–52. IEEE, 2006.
- [133] Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan, and YC Tay. Sift : A mac protocol for event-driven wireless sensor networks. In *European workshop on wireless sensor networks*, pages 260–275. Springer, 2006.
- [134] Navrati Saxena, Abhishek Roy, and Jitae Shin. Dynamic duty cycle and adaptive contention window based qos-mac protocol for wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 52(13) :2532–2542, 2008.
- [135] AM Firoze, LY Jun, and LM Kwong. Pr-mac a priority reservation mac protocol for wireless sensor networks. In *Electrical Engineering, 2007. ICEE'07. International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2007.

-
- [136] Zhenzhen Liu and Itamar Elhanany. Rl-mac : A qos-aware reinforcement learning based mac protocol for wireless sensor networks. In *Networking, Sensing and Control, 2006. ICNSC'06. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on*, pages 768–773. IEEE, 2006.
- [137] NOAH. No ad-hoc routing agent (noah). <http://icapeople.epfl.ch/widmer/uwb/ns-2/noah/>. Accessed : 2017.
- [138] MicaZ. Micaz specification. http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/micaz_datasheet-t.pdf. Accessed : 2018.

Résumé

Les dernières avancées technologiques dans le domaine de la microélectronique et de la communication sans fil ont permis le développement de nouveaux capteurs efficaces et moins coûteux. Ces dispositifs sont capables de collecter et de communiquer des données via un support sans fil de façon autonome, ce qui forme les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF). Ce type de réseaux a conquis une diversité de champs d'applications (services de santé, domotique, domaine militaire, surveillance de l'environnement, etc.). Cependant, il souffre de beaucoup de limitations. Le problème le plus critique rencontré dans ces réseaux est la limitation des ressources d'alimentation, qui affecte directement la qualité de service du réseau et la durée de vie des nœuds capteurs. Par conséquent, la couche MAC est considérée comme la première responsable à traiter ce problème, car l'émetteur-récepteur est la principale source de gaspillage d'énergie.

Dans cette thèse, nous nous concentrons sur trois types de RCSF : événementiels, périodiques et hétérogènes. Un RCSF événementiel est caractérisé par un trafic en rafale, comme dans les applications militaires où les capteurs doivent signaler tout mouvement dans le champ surveillé. Ce type d'application ne tolère pas la latence, car elle peut causer de gros dégâts. Alors qu'un RCSF périodique est caractérisé par un trafic périodique, comme dans les applications environnementales où les nœuds capteurs sont sensés transmettre périodiquement des données (température, humidité, etc.) à la station de base.

Pour répondre aux différentes exigences de ce type de réseaux, et surtout celles liées à la conservation d'énergie, nous avons conçu dans la première partie de cette thèse deux nouveaux protocoles MAC, appelés (Kalman Filter MAC (KF-MAC)) et (an Adaptive Duty-cycle MAC (AD-MAC)), capables d'adapter le cycle de sommeil/réveil des nœuds capteurs à la charge de trafic réseau. Ces protocoles utilisent des mécanismes de prédiction pour estimer le moment où les nœuds capteurs se réveillent ou se mettent en veille en fonction des statistiques précédentes du trafic dans le réseau.

Dans la deuxième partie, nous abordons les réseaux hétérogènes, qui constituent une bonne solution pour atteindre plusieurs objectifs en utilisant la même infrastructure. En effet, cette dernière permet la coexistence de différents types de nœuds dans le même réseau, ce qui met en évidence la nécessité de traiter disamment chacun de ces types en fonction de ses caractéristiques. Cependant, les réseaux hétérogènes ont besoin d'une nouvelle génération de protocoles de communication capables de gérer l'hétérogénéité du trafic et les capacités des nœuds. À cet égard, nous avons conçu un nouvel algorithme appelé (Energy based Collision Avoidance MAC (ECAMAC)) destiné à résoudre certains de ces problèmes. ECA-MAC donne la possibilité d'accéder au support de transmission en se basant sur le niveau énergétique des nœuds émetteurs.

Mots-clefs : Couche MAC, RCSF, application événementielle, filtre d'estimation, filtre de Kalman, qualité de service (QoS), faible consommation d'énergie, protocoles basés sur la contention.

Abstract

The latest technological advances in microelectronics and wireless communication fields have led to the development of new efficient and less expensive sensors. These devices are capable of collecting and transmitting data via wireless support autonomously, forming the (Wireless Sensor Network (WSN)). This type of network has conquered a variety of application fields (health services, home automation, military field, environmental monitoring, etc.). However, WSN suffers from many limitations. The most critical problem encountered in these networks is the limitation of power resources, which directly affects the (QoS) of the network and the sensor nodes lifespan. Therefore, the (MAC) layer is considered the first to deal with this problem because the transceiver is the main source of energy dissipation.

In this thesis, we focus on three types of WSN : event-driven, periodic and heterogeneous. An event-driven WSN is characterized by burst traffic, as in military applications where sensors must report any movement in the monitored field. This type of application does not tolerate latency because it can cause big damage. While a periodic WSN is characterized by periodic traffic, as in environmental applications where the sensor nodes must periodically transmit data (temperature, humidity, etc.) to the sink node.

To meet the different requirements of this type of application, especially the one related to energy conservation, we have designed in the first part of this thesis two new MAC protocols, called (KF-MAC) and (AD-MAC), able to adapt the sleep/wake cycle of sensor nodes to network traffic loads. These protocols use prediction mechanisms to estimate when the sensor nodes wake up or sleep based on previous traffic load statistics.

In the second part, we discuss heterogeneous networks, which are a good solution to achieve several objectives using the same infrastructure. Indeed, the latter causes the coexistence of different nodes in the same network, which highlights the need to process differently each type of nodes according to its characteristics. However, they need a new generation of communication protocols that can handle heterogeneous traffic and node capabilities. In this regard, we have designed a new algorithm called (ECA-MAC) to resolve some of these problems. ECA-MAC gives the possibility to access the transmission medium based on the energy level of the transmitter node.

Keywords : MAC layer, WSN, event-driven application, Kalman filter, quality of service (QoS), low power consumption, energy evaluation, contention-based protocols.