

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA DE BÉJAÏA
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES
DÉPARTEMENT INFORMATIQUE

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme

de Master en informatique

Thème :

Stratégie MIMO coopérative pour l'économie
d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Réalisé par :

BELLACHE Thiwiza

BENCHARIF Souad

Encadré par :

M^{elle} KHOULALENE Nadjjet

Devant le juré composé de :

Président M^r KHANOUCHE Mohamed-Essaid MAB Université de Béjaia

Examineurs M^{me} BOUTRID Samia MAB Université de Béjaia

M^{elle} TIAB Amel MAB Université de Béjaia

Promotion 2011/2012.

Remerciements

Nous exprimons nos remerciements à notre encadreur Madame KHOULALENE Nadjat pour l'assistance qu'elle nous a témoignée, pour sa disponibilité, pour ses orientations et conseils sans lesquels ce travail ne verra pas le jour, qu'elle trouve ici l'expression de notre gratitude.

Nous remercions tout particulièrement les membres de jury qui ont accepté de juger notre travail ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Un énorme Merci à Sofiane pour la qualité de sa collaboration, son aide constante à tous les niveaux. Nous le remercions pour sa disponibilité et sa patience.

Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Table des matières

Table des matières	vi
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	ix
Liste des acronymes	x
Introduction générale	1
1 Présentation des réseaux de capteurs sans fil	4
1.1 Introduction	4
1.2 Architecture d'un nœud capteur	4
1.2.1 Architecture matérielle	4
1.2.2 Architecture logicielle	6
1.3 Caractéristiques principales d'un capteur	6
1.4 Définition et architecture d'un réseau de capteurs sans fil	7
1.4.1 Architecture selon le type des nœuds	8
1.4.2 Architecture selon la mobilité des nœuds	10
1.5 Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil	10
1.5.1 Densité des nœuds	10
1.5.2 Topologie dynamique	11
1.5.3 L'auto-configuration des nœuds capteurs	11

1.5.4	Durée de vie limitée	11
1.5.5	Ressources limitées	12
1.6	Communication dans les RCSFs	12
1.6.1	Pile protocolaire	12
1.6.2	Types de communication	14
1.7	Facteurs de conception des réseaux de capteurs sans fil	15
1.8	Les applications des RCFs	16
1.8.1	Les applications orientées temps	17
1.8.2	Les Applications orientées événements	17
1.8.3	Les applications orientées requêtes	18
1.8.4	Les applications hybrides	18
1.9	Conclusion	18
2	 Routage et économie d'énergie dans les RCSFs	20
2.1	Introduction	20
2.2	Consommation d'énergie dans les RCSF	20
2.2.1	Énergie de capture	21
2.2.2	Énergie de traitement	21
2.2.3	Énergie de communication	21
2.3	Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie	22
2.3.1	État du module radio	22
2.3.2	Accès au medium de transmission	22
2.3.2.1	La retransmission	23
2.3.2.2	L'écoute active	23
2.3.2.3	La sur-écoute	23
2.3.2.4	La surcharge	23
2.3.2.5	La surémission	24
2.3.2.6	La taille des paquets	24
2.3.3	Modèle de propagation radio	24
2.3.4	Routage des données	24
2.4	Mécanismes de minimisation de la consommation d'énergie	25

2.4.1	Energie de capture	25
2.4.2	Energie de traitement	26
2.4.3	Energie de communication	26
2.4.3.1	Contrôle de la topologie	26
2.5	Contraintes liées au routage dans les réseaux de capteurs sans fil	27
2.5.1	Type des protocoles	27
2.5.2	Imprécision des capteurs	28
2.5.3	Routage des données	28
2.5.4	Gestion des données	28
2.5.5	Facteurs environnementaux	29
2.5.6	Canaux sans fil	29
2.5.7	Qualité de service	29
2.5.8	Connexité	30
2.5.9	Couverture	30
2.6	Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs	30
2.6.1	Selon le type du protocole	31
2.6.1.1	Protocoles de routage multi-chemin	31
2.6.1.2	Protocoles de routage basés sur la négociation des données	31
2.6.1.3	Protocoles de routage basés sur les interrogations	31
2.6.1.4	Protocoles de routage basés sur la QoS	32
2.6.2	Selon la structure de réseau	32
2.6.2.1	Les protocoles de routage plat (flat based-routing)	32
2.6.2.2	Les protocoles de routage hiérarchiques	35
2.6.2.3	Les protocoles de routage avec localisation géographique	40
2.6.3	Protocoles de routage selon la méthode d'établissement de routes	42
2.6.4	Protocoles de routage selon l'initiateur de communication	42
2.6.4.1	Initiation des communications par les nœuds sources	43
2.6.4.2	Initiation des communications par les nœuds destination	43
2.7	Conclusion	43

3	Stratégies MIMO coopératives proposées pour les RCSFs	44
3.1	Introduction	44
3.2	La technique MIMO (Multiple Input Multiple Output)	45
3.2.1	Modèle de système MIMO	45
3.2.1.1	Antennes à commutation de faisceaux ” switched beam antenna systems ” :	45
3.2.1.2	Antennes adaptatives ” adaptive antennas ” :	45
3.2.2	la Diversité	46
3.2.3	Architecture de Codes spatio-temporels	46
3.2.3.1	Codage spatio-temporel en treillis (CSTT)	47
3.2.3.2	Codes spatio-temporels par blocs	47
3.2.4	Codage canal	48
3.3	Techniques MIMO pour la minimisation de la consommation d’énergie dans les RCSFs	49
3.3.1	Energy Efficient Virtual MIMO-based Cooperative Communications for Wireless Sensor Networks	49
3.3.1.1	Les hypothèses	49
3.3.2	Virtual MIMO-Based Cross-Layer Design for Wireless Sensor Networks	51
3.3.2.1	Les hypothèses	52
3.3.2.2	Stratégie de sélection des nœuds de coopération	52
3.3.2.3	Protocole de conception	53
3.3.3	Virtual MIMO Channels in Cooperative Multi-hop Wireless Sensor Networks	54
3.3.3.1	Définition du modèle transmission/réception cluster à cluster	55
3.3.3.2	La probabilité d’interruption	56
3.3.3.3	Évaluation de performances	56
3.3.4	Energy Efficiency of MIMO Transmission Strategies in Wireless Sensor Networks	57
3.3.4.1	Les avantages	57
3.3.5	Energy efficiency of MIMO-based Sensor Networks with a Cooperative Node Selection Algorithm	58
3.3.5.1	L’analyse de dissipation de puissance	58

3.3.5.2	La solution proposée	59
3.3.5.3	Avantage de la solution proposée	60
3.3.6	Joint rate and cooperative MIMO scheme optimization for uniform energy distribution in Wireless Sensor Networks	60
3.3.6.1	Côté Émission	60
3.3.6.2	Côté Réception	60
3.3.6.3	La consommation d'énergie dans une communication MIMO coopérative	61
3.3.6.4	Évaluation de performances	61
3.3.7	Energy Efficiency Evaluation of Alternative MIMO - based Sensor Networks	61
3.3.7.1	La structure MIMO simple	62
3.3.7.2	La structure MIMO combinée multi-sauts	63
3.3.7.3	Évaluation de performances	64
3.3.8	Optimisation énergétique des transmissions MIMO Coopératives pour les réseaux de capteurs.	64
3.3.8.1	Étape de l'émission	64
3.3.8.2	Étape de réception	65
3.3.8.3	Évaluation de performances	65
3.3.8.4	Discussion	65
3.4	Conclusion	66
4	Algorithme d'équilibrage de charge et économie d'énergie pour les RCSFs	67
4.1	Introduction	67
4.2	Motivations	68
4.3	Principe de la proposition	69
4.3.1	Phase d'initialisation	69
4.3.2	Phase d'auto-désignation des clusters-heads	71
4.3.3	Phase de rattachement aux cluster-heads	72
4.3.4	Phase de sélection des nœuds coopératifs (NC)	74
4.3.5	Phase de routage et transmission de données	75
4.4	Conclusion	77

5	Simulation et Evaluation de performances	78
5.1	Introduction	78
5.2	Etapas du simulateur	79
5.2.1	Métriques de performances	80
5.2.2	Modèle de simulation	81
5.2.3	Description du système	81
5.2.4	Modèle d'énergie	82
5.2.5	Variables descriptives du système	83
5.2.6	Événements discrets du système	84
5.2.7	Evaluation de performances	85
5.2.7.1	Nombre moyen de clusters	86
5.2.7.2	Nombre moyen des nœuds coopératifs	86
5.2.7.3	Energie consommée	87
5.2.7.4	La probabilité de réception des données	88
5.3	Conclusion	89
	Conclusion générale et perspectives	90
	Bibliographie	91

Table des figures

1.1	L'architecture matérielle d'un nœud capteur	6
1.2	Capteurs fabriqués par UC Berkeley	7
1.3	Architecture d'un réseau de capteurs	8
1.4	Topologie plate (Flat)	9
1.5	Topologie Hiérarchique	10
1.6	La pile protocolaire d'un réseau de capteurs	12
1.7	Les types de communication dans un réseau de capteurs	14
1.8	Classifications des applications des RCFs	17
1.9	Applications des réseaux de capteurs sans fil	18
2.1	La sur-écoute dans une transmission	23
2.2	Les techniques de conservation d'énergie.	25
2.3	Les protocoles de routage selon le type de protocole	31
2.4	Les protocoles de routage selon la structure de réseau	32
2.5	Routage plat	33
2.6	Fonctionnement du protocole SPIN	34
2.7	Routage hiérarchique	36
2.8	Routage basé sur la localisation	41
3.1	Architecture d'un système de codage spatio-temporel	46
3.2	Code en blocs	48
3.3	Une communication MIMO-coopérative	50

3.4	Le protocole Multi-saut MIMO virtuel	51
3.5	Modèle de consommation d'énergie	61
3.6	Approche MIMO pour les réseaux de capteurs sans fil	63
3.7	La structure MIMO multi-sauts	63
4.1	Emission d'un vecteur (e, d) par chaque capteur à tous ses voisins	70
4.2	L'envoi des notes déterminées	71
4.3	L'auto-désignation des cluster-heads	72
4.4	Envoi des facteurs de charge aux voisins par les cluster-heads	73
4.5	Formation des clusters	73
4.6	Demande de coopération	74
4.7	La sélection des nœuds coopératifs	75
4.8	Transmission de données via un système coopératif	77
5.1	Fonctionnement du simulateur	79
5.2	Modèle d'énergie	82
5.3	Variation du nombre de clusters formés en fonction de la portée	86
5.4	Variation du nombre de nœuds coopératifs en fonction de la portée	87
5.5	Variation de la quantité d'énergie consommée en fonction de la portée	88
5.6	Variation de la probabilité de réception des données en fonction de la portée	88

Liste des tableaux

5.1 Variables descriptives du système	83
5.2 Événements discrets du système	85

Liste des acronymes

RCSF : Réseaux de Capteurs Sans Fil

LLC : Logical Link Control

DVS : Dynamique Voltage Scaling

CSIP : Collaborative Signal and Information Processing

GPS : Global Positioning System

PDR : Paquet Delivery Ratio

GAF : Geographic Adaptive Fidelity

SAR : Sequential Assignment Routing

MIMO : Multiple Input Multiple Output

SISO : Single Input Single Output

CSI : Channel State Information

STBC : Codes spatio-temporels par blocs

BPSK : Binary Phase-Shift-Keying

Introduction générale

Les progrès technologiques dans les domaines de la microélectronique, des communications sans fil, couplés aux efforts de miniaturisation et la réduction des coûts de production des composants électroniques, ont permis le développement de nouvelles générations de réseaux sans fils. Ces derniers offrent beaucoup d'avantages notamment en termes de déploiement.

Des réseaux pour téléphones mobiles aux réseaux locaux sans fil en passant par les réseaux ad-hoc, la recherche aujourd'hui s'est beaucoup focalisée sur les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Network - WSN), ceux-ci sont composés d'un grand nombre de nœuds communicants. Ils apportent une perspective intéressante : celle de réseaux capables de s'auto-configurer et de s'auto-gérer sans qu'il y ait besoin d'interventions humaines. Les nœuds sont généralement déployés de manière aléatoire à travers une zone géographique, appelée zone d'intérêt. Les données récoltées sont acheminées grâce à des communications sans fil en multi-saut (c.-à-d. de proche en proche) à une station de base (ou puits) dont le rôle est entre autre d'agréger/exploiter les données récoltées. Elle représente en quelque sorte le point d'entrée du réseau de capteurs.

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) peuvent être appliqués dans de nombreux domaines : surveillance des déplacements des véhicules en zone hostile, observation de la vie des espèces rares, surveillance de la structure des infrastructures, optimisation de traitement pour les patients, etc.

Le routage est fondamental dans ce type de réseau car il n'existe pas d'infrastructure qui gère les informations échangées entre les différents nœuds du réseau (comme par exemple les routeurs dans

les réseaux filaires). En effet, c'est à chaque nœud du réseau de jouer le rôle d'un routeur. Ainsi, tous les nœuds collaborent afin de router une information vers une certaine destination.

Un facteur commun, préoccupation principale dans pratiquement la majorité des travaux sur les réseaux de capteurs, est celui de la réduction de la consommation énergétique, ou du moins sa rationalisation. En effet, les réseaux de capteurs sont destinés, le plus souvent, à relever des informations dans des environnements hostiles ou difficilement accessibles sans aucune intervention humaine. Il est donc difficilement envisageable de trouver une autre source d'énergie que celle des batteries. C'est pour cette raison qu'on les considère autonomes. Leur durée de vie est par conséquent égale à la durée de vie de leur batterie. La consommation énergétique est donc la contrainte clef dans les réseaux de capteurs, elle transcende tous les travaux depuis le niveau le plus bas (physique), jusqu'au niveau application (exploitation des données).

Nous nous sommes intéressés à la problématique suivante : l'économie d'énergie dans les RCSFs. Pour cela notre solution comporte des mécanismes de minimisation de consommation d'énergie dont l'idée s'inspire d'une technique MIMO (Multiple Input - Multiple Output) coopérative. Cette dernière tente à former un système coopératif après la formation des clusters pour les transmissions des données afin de minimiser la consommation d'énergie dans les RCSFs. L'objectif du travail présenté est donc de proposer une approche coopérative pour le problème de consommation énergétique afin de maximiser la durée de vie du réseau.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons une description générale des réseaux de capteurs sans fil, en décrivant leurs caractéristiques, leurs domaines d'applications, ainsi que leurs architectures.

Le deuxième chapitre décrit les défis liés à la conception d'un protocole de routage dans les RCSFs, les approches de routage sont également étudiées, une classification des protocoles conçus pour ce type de réseau et la problématique relative à la minimisation de la consommation d'énergie sont explicitées.

Le troisième chapitre définit les différentes stratégies MIMO coopératives proposées pour les réseaux de capteurs sans fil.

La solution proposée visant à conserver l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil fait l'objet

du quatrième chapitre, en tenant compte des différentes étapes de l'algorithme proposé qui seront détaillées dans ce chapitre.

Les résultats de simulation obtenus sont présentés et discutés dans le cinquième chapitre.

Enfin, notre mémoire s'achève par une conclusion générale résumant les points essentiels qui ont été abordés ainsi que des perspectives que nous souhaitons accomplir prochainement.

Chapitre 1

Présentation des réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Les avancées réalisées dans le domaine des technologies des communications sans fils (wifi, Bluetooth, ...) et de taille microélectronique (microcontrôleur, DSP...), ont mené à l'apparition de plusieurs nouvelles technologies à un coût de production très réduit, tel que les nœuds capteurs, qui sont capables de générer et d'échanger des données d'une manière autonome et complètement transparente pour les utilisateurs. Les réseaux de capteurs représentent actuellement un nouveau domaine, en plein développement. Ces derniers sont utilisés dans plusieurs domaines, ce qui a attiré plusieurs chercheurs à travailler dessus.

Dans ce chapitre, nous présenterons les réseaux de capteurs sans fil, en décrivant leur architecture, leurs caractéristiques et contraintes de conception ainsi que leurs domaines d'applications.

1.2 Architecture d'un nœud capteur

1.2.1 Architecture matérielle

La principale tâche d'un nœud capteur dans un RCSF est de détecter, traiter et transmettre des données. Un nœud capteur est constitué de quatre composants essentiels qui sont :

1. **L'unité de captage ou " sensing unit "** : elle se compose du capteur et du convertisseur analogique/numérique (ADC). En effet, le signal analogique produit par le capteur suite à un phénomène observé va être transformé par l'ADC en un signal numérique.
2. **L'unité de traitement ou " Processing unit "** : elle est composée d'un processeur (microcontrôleur) et d'une unité de stockage de petite taille. Elle permet au nœud la gestion des procédures de collaboration avec les autres nœuds dans le but d'accomplir la tâche demandée. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les stocke en mémoire ou les envoie à l'unité de transmission.
3. **L'unité de communication ou " transceiver unit "** : elle est composée d'un émetteur/récepteur (module radio) permettant la communication entre les différents nœuds du réseau [14].
4. **L'unité d'énergie ou " power unit "** : c'est la batterie, qui n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de conception de protocoles pour les réseaux de capteurs. Les unités d'énergie peuvent être supportées par des photopiles qui permettent de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique [14].

Il existe des applications dont les besoins nécessitent d'autres composants qui s'ajoutent à ceux décrits précédemment, comme :

- Le système de localisation pour déterminer la position des nœuds.
- Le mobilisateur ou " mobilizer " pour déplacer un nœud d'un lieu à un autre.

La figure 1.1 illustre l'architecture matérielle d'un nœud capteur :

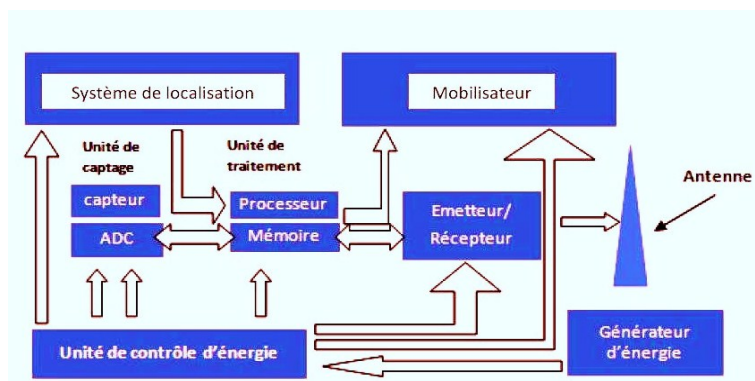


FIGURE 1.1 – L'architecture matérielle d'un nœud capteur

1.2.2 Architecture logicielle

Les systèmes embarqués sont des systèmes d'exploitation prévus pour fonctionner sur des machines de petite taille, tels que des nœuds capteurs. Les systèmes d'exploitation conçus pour les nœuds de RCSF sont généralement moins complexes que les autres systèmes d'exploitation. Ceci est dû aux exigences particulières des applications des réseaux de capteurs et des contraintes de ressources des capteurs. Plusieurs systèmes d'exploitation sont conçus pour les nœuds de RCSF. Parmi ces systèmes, nous citons TinyOS, SOS, etc. TinyOS est le système d'exploitation le plus répandu. TinyOS c'est un système d'exploitation open source développé par l'université de Berkeley. Sa conception a été entièrement réalisée en NesC, langage orienté composants syntaxiquement proche du C. La bibliothèque des composants de TinyOS est particulièrement complète puisqu'on y retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données. Un programme s'exécutant sur TinyOS est constitué d'une sélection de composants systèmes et de composants développés pour l'application à laquelle il sera destiné (mesure de température, du taux d'humidité, etc.). TinyOS s'appuie sur un fonctionnement événementiel, c'est-à-dire qu'il ne devient actif qu'à l'apparition de certains événements ; par exemple, l'arrivée d'un message radio [7,8,9,10,37].

1.3 Caractéristiques principales d'un capteur

Deux entités sont fondamentales dans le fonctionnement d'un capteur : l'unité d'acquisition qui est le cœur physique permettant la prise de mesures et l'unité de communication qui réalise la trans-

mission de celles-ci vers d'autres dispositifs électroniques. Ainsi, fonctionnellement chaque capteur possède un rayon de communication (R_c) et un rayon de capture (R_s). La zone de communication est la zone où le capteur A peut communiquer avec les autres capteurs. D'autre part, la zone de sensation est la zone où le capteur A peut capter un événement [3].

Les principaux avantages des noeuds capteurs sont : leur taille réduite (voir figure 1.3), leur très faible consommation électrique et surtout leur capacité à communiquer sans fil (ce qui permet une grande liberté de mouvement par rapport aux noeuds filaires) [11].

En effet, pour qu'un capteur ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant. Cependant, l'énergie consommée serait importante.

Il existe dans le monde plusieurs fabricants de capteurs. Nous citerons ceux fabriqués par UC Berkeley [3]. Parmi ces capteurs, il existe quelques uns qui sont capables de varier la puissance du signal émis afin d'élargir/réduire le rayon de communication et en conséquence la zone de communication. La Figure 1.3 montre quelques types de capteurs fabriqués par UC Berkeley.

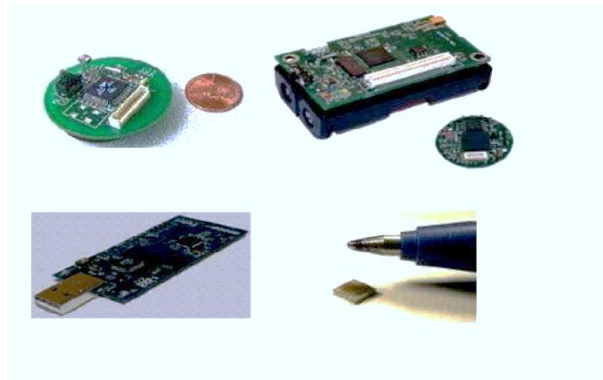


FIGURE 1.2 – Capteurs fabriqués par UC Berkeley

1.4 Définition et architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Les nœuds capteurs sont des capteurs intelligents " smart sensors ", capables d'accomplir trois tâches complémentaires : le relevé d'une grandeur physique, le traitement éventuel de cette information et la communication avec d'autres capteurs [2,4]. Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est un

ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers.

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans un champ de capture (Sensor field), d'une manière à ce qu'ils forment un réseau sans fil multi-saut, chaque nœud a pour mission la collecte des données et leur routage vers la station de base. À son tour, la station de base (Sink) qui est un point de collecte transmet les informations reçues par internet ou par satellite à l'utilisateur final (poste de contrôle), comme l'illustre la figure ci-dessous.

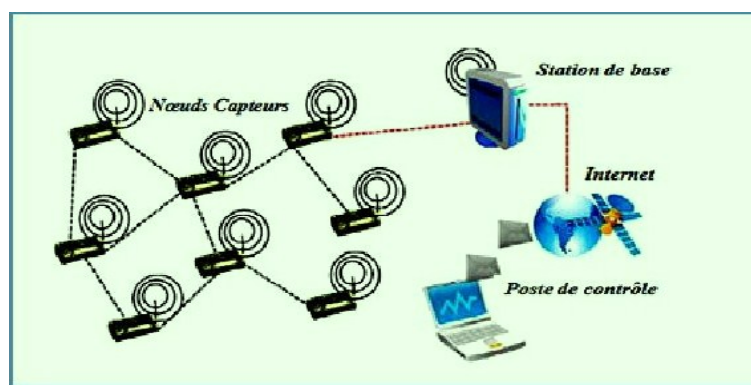


FIGURE 1.3 – Architecture d'un réseau de capteurs

Il existe plusieurs types d'architectures de RCSF, parmi lesquelles nous citerons :

1.4.1 Architecture selon le type des nœuds

a) Les réseaux de capteurs plats : un réseau de capteurs sans fil plat, est un réseau homogène, où tous les nœuds sont identiques en termes de batterie et des fonctions, excepté le Sink. Ce dernier joue le rôle d'une passerelle et est responsable de la transmission de l'information collectée à l'utilisateur final .

Dans le cas où la destination ne fait pas partie du voisinage de la source, les données seront transmises en utilisant les sauts multiples à travers les nœuds intermédiaires comme c'est illustré dans la figure 1.5. Ce type de réseau représente l'avantage de l'existence de différents chemins d'une source vers une destination et cela afin de remédier au problème de changement brusque de topologie ou la défaillance d'un nœud intermédiaire [2,16].

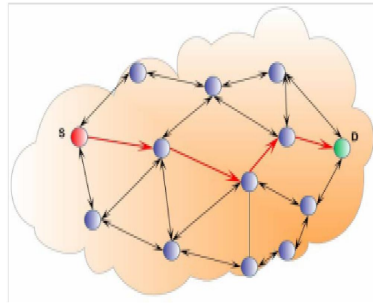


FIGURE 1.4 – Topologie plate (Flat)

b) Les réseaux de capteurs hiérarchiques : les protocoles à topologie hiérarchique forment des réseaux dans lesquels un nœud central Sink (le niveau supérieur de la hiérarchie) est relié à un ou plusieurs autres nœuds qui appartiennent à un niveau plus bas dans la hiérarchie (deuxième niveau) avec une liaison point à point. Aussi, chacun des nœuds du deuxième niveau aura également un ou plusieurs autres nœuds de niveau plus bas dans la hiérarchie (troisième niveau) reliés à lui avec une liaison point à point. Chaque ensemble de nœuds forme une sorte de motif (Cluster). Le nœud central n'a aucun autre nœud au-dessus de lui dans la hiérarchie sauf le centre de traitement des données ou la passerelle si elle existe. Les nœuds du deuxième niveau jouent le rôle des passerelles entre ceux du troisième niveau et le Sink. Dans ce cas, le routage devient plus simple, puisqu'il s'agit de passer par les passerelles pour atteindre le nœud destination [7,16].

Un réseau basé sur une topologie hiérarchique doit avoir au moins trois niveaux dans sa hiérarchie, puisqu'un réseau avec un nœud central Sink et seulement un niveau hiérarchique au-dessous, forme une topologie en étoile.

Si les nœuds dans un réseau basé sur la topologie hiérarchique doivent effectuer un tel traitement sur les données transmises entre les nœuds dans le réseau, alors les nœuds qui sont à des niveaux plus élevés dans la hiérarchie doivent effectuer plus de traitement que les nœuds de niveau inférieur.

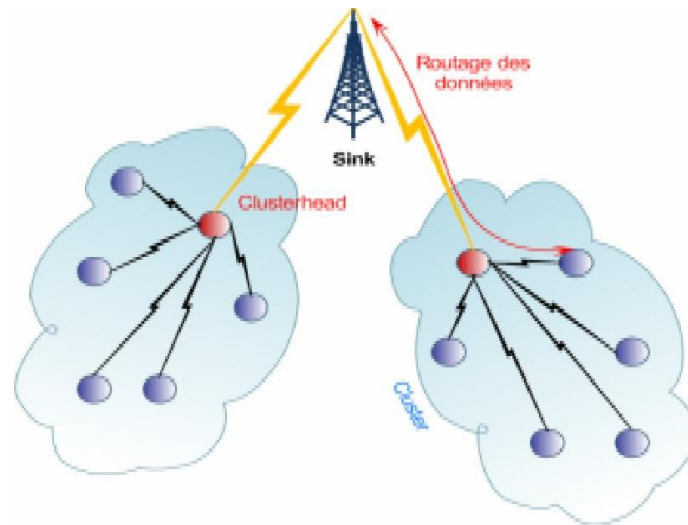


FIGURE 1.5 – Topologie Hiérarchique

1.4.2 Architecture selon la mobilité des nœuds

a) Capteurs mobiles : le réseau est constitué d'un ensemble de capteurs mobiles évoluant dans un environnement hostile (champ de bataille par exemple). Le but d'un tel réseau, dans la plupart du temps, est l'exploration de zones inaccessibles ou dangereuses, les nœuds jouant à la fois le rôle de capteur et d'actionneur.

b) Capteurs immobiles : le réseau est constitué de capteurs immobiles servant à la surveillance d'occurrence d'évènements sur une zone géographique. Ici, le réseau n'effectue que la surveillance, les données mesurées sont transmises en mode multi-sauts au nœud puits.

1.5 Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil

Les principales caractéristiques des réseaux de capteurs se résument dans ce qui suit :

1.5.1 Densité des nœuds

Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un nombre très important de nœuds pour garantir une couverture totale de la zone surveillée. Ceci engendre un niveau de surveillance élevé et assure une transmission plus fiable des données sur l'état du champ de capture.

1.5.2 Topologie dynamique

La topologie des réseaux de capteurs peut changer au cours du temps pour les raisons suivantes [14] :

1. Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (champ de bataille par exemple), la défaillance d'un nœud capteur est donc très probable.
2. Un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie.
3. Dans certaines applications, les nœuds capteurs et les stations de base sont mobiles.

1.5.3 L'auto-configuration des nœuds capteurs

Dans un RCSF, les nœuds sont déployés, soit d'une manière aléatoire (missile, avion...), soit placés nœud par nœud par un humain ou un robot, et ceci à l'intérieur ou autour du phénomène observé (champ de bataille, surface volcanique, etc....). Ainsi, un nœud capteur doit avoir des capacités d'une part, pour s'auto-configurer dans le réseau, et d'autre part pour collaborer avec les autres nœuds dans le but de reconfigurer dynamiquement le réseau en cas de changement de topologie . Dans un RCSF, chaque nœud X possède une unité émettrice/réceptrice qui lui permet de communiquer avec les nœuds qui lui sont proches. En échangeant des informations avec ces derniers, le nœud X pourra alors découvrir ses nœuds voisins et ainsi connaître la méthode de routage qu'il va adopter selon les besoins de l'application. L'auto-configuration apparaît comme une caractéristique nécessaire dans le cas des RCSF étant donné que, d'une part leur déploiement s'effectue d'une manière aléatoire dans la majorité des applications, et d'autre part le nombre des nœuds capteurs est très grand [14].

1.5.4 Durée de vie limitée

La durée de vie est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où le premier nœud tombe énergétiquement. Cette durée de vie peut aussi avoir un rapport avec la connectivité du réseau, et représenter le temps jusqu'à la partition du réseau en deux parties disjointes. Selon l'utilisation, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années [14].

1.5.5 Ressources limitées

En plus de l'énergie, les noeuds capteurs ont aussi une capacité de traitement et de mémoire limitée. En effet, les industriels veulent mettre en oeuvre des capteurs simples, petits et peu coûteux qui peuvent être achetés en masse [14].

1.6 Communication dans les RCSFs

Dans les réseaux de capteurs, les noeuds sont déployés dans un environnement sans infrastructure. Pour cela, les noeuds capteurs doivent graduellement établir l'infrastructure de communication durant une phase d'initialisation, qui leur permettra de répondre aux requêtes venant des sites distants, d'interagir avec l'environnement physique, de réagir aux données captées et de transmettre ces données via une communication multi sauts. Pour cela plusieurs protocoles ont été mis en place [1].

1.6.1 Pile protocolaire

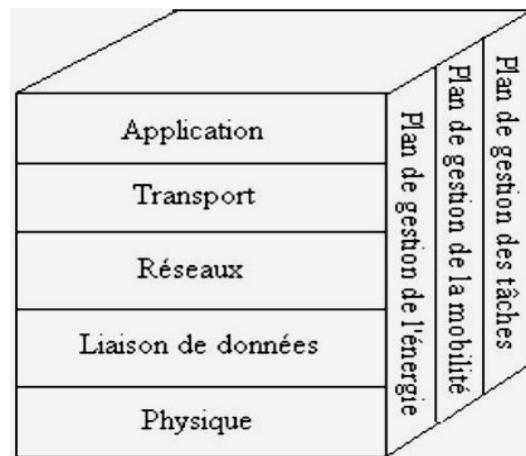


FIGURE 1.6 – La pile protocolaire d'un réseau de capteurs

La pile protocolaire dans les réseaux de capteurs se compose de plusieurs couches :

- La couche physique : elle offre des techniques d'émission, de réception et de modulation de données d'une manière robuste [1].
- La couche de liaison de données : elle est composée d'une couche de contrôle des liens logiques

(LLC) et d'une couche de contrôle d'accès au médium (MAC pour Médium Access Control).

- LLC : encapsule les segments venant de la couche réseau par l'ajout des en-têtes nécessaires, rassemble et fragmente les trames MAC, gère les erreurs et d'adressage.

- Puisque l'environnement est bruyant et les capteurs peuvent être mobiles, un protocole MAC doit connaître l'état de l'énergie résiduelle et être capable de réduire au minimum les collisions causées par l'émission simultanée des noeuds voisins [5].

• La couche réseau : elle s'occupe du routage des données fournies par la couche transport.

• La couche transport : la couche transport vérifie le bon acheminement des données et la qualité de transmission et sert également à maintenir le flux de données en cas de nécessité dans les applications utilisées. Les principaux objectifs de cette couche sont [5] :

- Multiplexer et démultiplexer les messages entre les applications et la couche réseau ;
- Réaliser un contrôle de haut niveau sur les données.

• La couche application : selon les tâches de capture, différents types de logiciels d'application peuvent être établis et employés dans cette couche.

En plus de ces cinq couches, la pile protocolaire comporte trois niveaux :

- Le niveau de gestion d'énergie : les protocoles de ce niveau gèrent l'énergie consommée par les capteurs. Par exemple, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de capture.
- Le niveau de gestion de mobilité : ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, de manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final [1].

- Le niveau de gestion des tâches : le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution de la charge de travail sur les différents nœuds du réseau afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie.

1.6.2 Types de communication

En général, deux types de nœuds sont identifiés logiquement ; les nœuds qui principalement transmettent leurs propres données capturées (nœuds capteur) et les nœuds qui transmettent les messages aux autres nœuds du réseau (nœuds de relais) [5]. Les données captées sont acheminées depuis les nœuds sources jusqu'aux nœuds destinataires à travers les nœuds intermédiaires, créant ainsi une topologie multi-sauts.

Comme illustré dans la figure 1.7, cette organisation logique implique quatre types de communication :

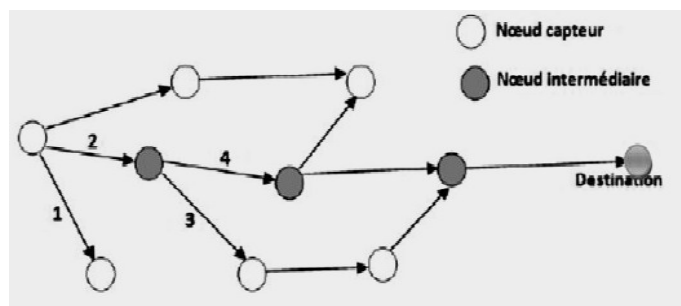


FIGURE 1.7 – Les types de communication dans un réseau de capteurs

1. La communication d'un nœud capteur avec un autre nœud capteur : ce type de communication directe est employé pour des opérations locales, par exemple pendant le processus de clusterisation (Organisation du réseau en groupes de capteurs) [5].
2. La communication d'un nœud capteur avec un nœud intermédiaire : les données captées sont transmises d'un nœud capteur à un nœud intermédiaire. Ce type de communication est souvent unicast.
3. La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud capteur : les requêtes et les messages de signalisation sont souvent multicast. Ils sont diffusés par les nœuds intermédiaires

pour atteindre immédiatement un sous-ensemble de nœuds [5].

4. La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud intermédiaire : la communication entre ces nœuds est dans la plupart du temps unicast.

Dans les quatre types de communication, l'énergie est une ressource critique qui fait de la consommation une métrique primaire à considérer. De nombreuses techniques d'optimisation, parfois en opposition les unes aux autres, sont étudiées pour minimiser les dépenses énergétiques et augmenter la durée de vie du réseau.

1.7 Facteurs de conception des réseaux de capteurs sans fil

La conception des réseaux de capteurs est influencée par de nombreux facteurs comme la tolérance aux pannes, les coûts de production, la consommation d'énergie, l'environnement ou la topologie du réseau. Ces facteurs représentent la base de la conception de protocoles ou d'algorithmes pour les réseaux de capteurs [6]. La spécificité des applications des RCSF (militaires, sismiques et autres) fait que la recharge ou le remplacement de ces batteries sont une tâche difficile ou presque impossible, ce qui nous mène à déduire que la durée de vie d'un nœud est essentiellement dépendante de la durée de vie de la batterie. Ainsi, la méthode de gestion de consommation d'énergie constitue une contrainte majeure dans ce type de réseau [14].

a) Bande passante limitée : puisque la puissance des unités de traitements est limitée, les nœuds capteurs ne peuvent pas supporter des débits élevés.

b) Tolérance aux pannes : les nœuds peuvent être sujets à des pannes dues à leur fabrication en série (produits bon marché, il peut donc y avoir des capteurs défectueux) ou plus fréquemment à un manque d'énergie. Les interactions externes (chocs, interférences) peuvent aussi être la cause des dysfonctionnements. Afin que les pannes n'affectent pas la tâche première du réseau, il faut évaluer la capacité du réseau à fonctionner sans interruption.

c) Coût de fabrication : les nœuds sont des produits fabriqués en série. Il faut que le coût de

fabrication de ces nœuds soit tel que le coût global du réseau ne soit pas supérieur à celui d'un réseau classique afin de pouvoir justifier son intérêt [6].

d) Consommation d'énergie : l'économie d'énergie est une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner [6]. Dans un réseau de capteurs fonctionnant selon un mode de routage par sauts, chaque nœud du réseau joue un rôle important dans la transmission de données. Le mauvais fonctionnement d'un nœud implique un changement dans la topologie et impose une réorganisation du réseau.

e) Agrégation de donnée : dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et ainsi d'améliorer sa durée de vie. L'une des techniques utilisée pour réduire la transmission d'informations redondantes est l'agrégation des données. Avec cette technique, les nœuds intermédiaires agrègent l'information reçue de plusieurs sources. Cette technique est connue aussi sous le nom de fusion de données.

f) Facteur d'échelle : le nombre de nœuds déployés pour une application peut atteindre des milliers. Dans ce cas, le réseau doit fonctionner avec des densités de capteurs très grandes. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues [13].

1.8 Les applications des RCFs

Les réseaux de capteurs sans fil ont été classés parmi les 21 technologies les plus importantes du 21^{ème} siècle [12]. En effet, la recherche dans le domaine des capteurs est en train de vivre une révolution importante, ouvrant des perspectives d'impacts significatifs dans de nombreux domaines.

Ainsi, les applications des RCSF sont classées en quatre classes d'applications : orientées temps (time driven), orientées événements (event driven), orientées requêtes (query driven) et hybride [13].

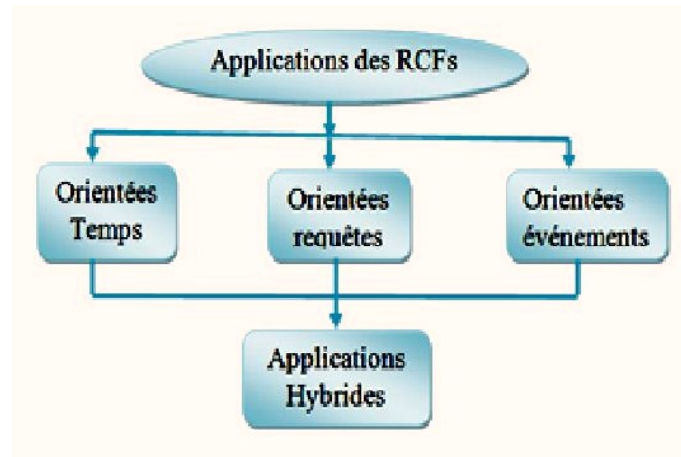


FIGURE 1.8 – Classifications des applications des RCSF

1.8.1 Les applications orientées temps

Cette classe représente les applications où l'acquisition et la transmission des données capturées sont liées au temps : instant précis, période d'acquisition...etc. Cette période d'acquisition peut être plus au moins longue selon l'application (de quelques secondes jusqu'à quelques heures voire des jours). Ainsi, la quantité de données échangée dans le réseau dépend de la périodicité des mesures à effectuer sur l'environnement local. La collecte de données environnementales peut représenter un bon exemple de cette classe d'application dans des domaines variés : agriculture, expérimentation scientifique, etc... [11,14].

1.8.2 Les Applications orientées événements

Dans ce cas, les capteurs envoient leurs données seulement si un événement spécifique se produit. On peut citer l'exemple de surveillance des feux de forêts où un capteur envoi des alarmes à la station de base dès que la température dépasse un certain seuil. Au départ, cette classe d'application était conçue à des fins militaires, comme la surveillance du déplacement d'objets dans le champ de bataille. De nouvelles perspectives comme le contrôle industriel, le contrôle médical des patients, la surveillance d'édifices (barrages, ponts, voies de chemins de fer,..... etc)[11,15].

1.8.3 Les applications orientées requêtes

Dans ce cas, un capteur envoie de l'information uniquement suite à une demande explicite de la station de base. Cette classe d'application est destinée aux applications adaptées à l'utilisateur. Ce dernier peut requérir des informations à partir de certaines régions dans le réseau ou interroger les capteurs pour acquérir des mesures d'intérêts. Dans ce cas, des connaissances sur la topologie du réseau et l'emplacement des capteurs sont nécessaires [11,14].

1.8.4 Les applications hybrides

Ce type d'application met en œuvre les trois modes de fonctionnement décrits précédemment. Par exemple, dans un réseau conçu pour le suivi d'objets, le réseau peut combiner entre un réseau de surveillance (*time driven*) et un réseau de collecte de données par événements (*event driven*) [14].

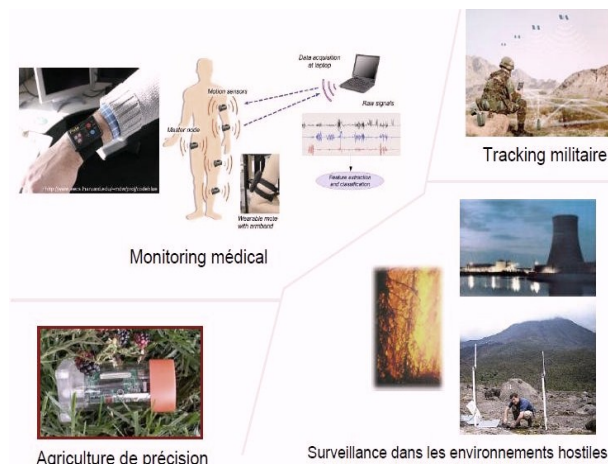


FIGURE 1.9 – Applications des réseaux de capteurs sans fil

1.9 Conclusion

Contrairement aux réseaux traditionnels qui se préoccupent de garantir une bonne qualité de service, les réseaux de capteurs doivent, en plus, donner de l'importance à la conservation d'énergie. Ils doivent intégrer des mécanismes qui permettent aux utilisateurs de prolonger la durée de vie du réseau en entier, car chaque nœud est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les différentes approches de routage conçues pour les réseaux de capteurs sans fil et définir les différents mécanismes de conservation d'énergie dans ce type de réseaux.

Chapitre 2

Routage et économie d'énergie dans les RCSFs

2.1 Introduction

Les caractéristiques des réseaux des capteurs, comme la densité importante des nœuds et la topologie qu'ils forment, exigent des protocoles de routage spécifiques, différents de ceux déployés dans les réseaux usuels. De ce fait, le développement de nouveaux protocoles de routage s'avère indispensable. Ces protocoles doivent tenir compte de l'aspect fonctionnel de ces réseaux tout en optimisant les calculs nécessaires pour choisir une route optimale. Dans ce chapitre, nous allons présenter les techniques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil et ainsi que les différentes familles de protocoles de routage conçus pour ce type de réseau.

2.2 Consommation d'énergie dans les RCSF

La conservation d'énergie est importante dans un RCSF pour augmenter la durée de vie du nœud, par conséquent, celle de tout le réseau. Les capteurs sont conçus pour fonctionner durant des mois voire des années. Ainsi, la capacité énergétique des capteurs doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du réseau. A noter qu'une fois qu'un nœud capteur a épuisé son énergie, il est considéré comme défaillant. Ainsi, il y a une forte probabilité de perdre la connectivité du réseau. Par conséquent maximiser la durée de vie du réseau, revient à réduire la consommation énergétique

des nœuds qui est une contrainte clé dans les réseaux de capteurs sans fil [14,17].

Nous présenterons dans ce qui suit les principales solutions proposées dans la littérature pour la gestion de la consommation de l'énergie.

2.2.1 Énergie de capture

L'énergie de capture est dissipée pour accomplir les tâches suivantes : échantillonnage, traitement de signal, conversion analogique/numérique et activation de la sonde de capture. En général, l'énergie de capture représente un faible pourcentage de l'énergie totale consommée par un nœud [47].

2.2.2 Énergie de traitement

L'énergie de traitement se divise en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel). Par contre l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication [14,47].

2.2.3 Énergie de communication

L'énergie de communication se décline en deux parties : l'énergie de réception et l'énergie de l'émission. Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance. Quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur [47].

2.3 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs qui sont expliqués ci-dessous.

2.3.1 État du module radio

Le module radio est le composant du nœud capteur qui consomme le plus d'énergie, puisque c'est lui qui assure la communication entre les nœuds. On distingue quatre états des composants radio (transmetteur et récepteur) : actif, réception, transmission et sommeil [48].

- État actif : la radio est allumée, mais elle n'est pas employée. En d'autres termes, le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre. Cet état provoque une perte d'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission. Pour éviter cette perte d'énergie, un capteur doit s'activer qu'en cas de nécessité, et le reste du temps il doit se mettre dans l'état sommeil.

- État sommeil : la radio est mise hors tension.

- État transmission : la radio transmet un paquet.

- État réception : la radio reçoit un paquet.

2.3.2 Accès au medium de transmission

La sous couche MAC assure l'accès au support de transmission, la fiabilité de transmission, le contrôle de flux, la détection d'erreur et la retransmission des paquets. Puisque les nœuds partagent le même médium de transmission, la sous-couche MAC joue un rôle important dans la coordination entre les nœuds et la minimisation de la consommation d'énergie. En effet, minimiser les collisions entre les nœuds permet de réduire la perte d'énergie [49].

Les principales causes de consommation d'énergie au niveau de la couche MAC sont les suivantes :

2.3.2.1 La retransmission

Les nœuds capteurs possèdent en général une seule antenne radio et partagent le même canal de transmission. Par ailleurs, la transmission simultanée des données provenant de plusieurs capteurs peut produire des collisions et ainsi une perte de l'information transmise. La retransmission des paquets perdus peut engendrer une perte significative de l'énergie [49].

2.3.2.2 L'écoute active

L'écoute active (*idle listening*) du canal pour une éventuelle réception de paquet peut engendrer une perte importante de la capacité des nœuds en énergie. Pour éviter ce problème, il faut basculer les nœuds dans le mode sommeil le plus longtemps possible, mais le coût de la transition entre les modes consomme également de l'énergie [17,49].

2.3.2.3 La sur-écoute

Le phénomène de sur-écoute (*overhearing*) se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés (voir figure 2.1). La sur-écoute conduit à une perte d'énergie additionnelle à cause de l'implication des autres capteurs dans la réception des données.

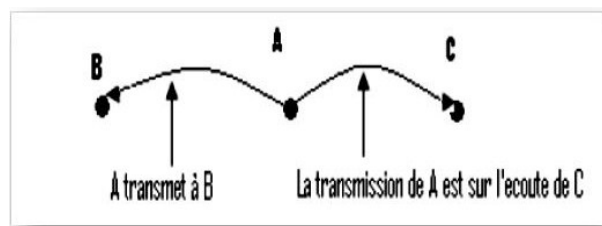


FIGURE 2.1 – La sur-écoute dans une transmission

2.3.2.4 La surcharge

Plusieurs protocoles de la couche MAC fonctionnent par échange de messages de contrôle (*overhead*) pour assurer différentes fonctionnalités : signalisation, connectivité, établissement de plan d'accès et évitement de collisions. Tous ces messages nécessitent une énergie additionnelle [49].

2.3.2.5 La surémission

Le phénomène de surémission (*overemitting*) se produit quand un nœud capteur envoie les données à un destinataire qui n'est pas prêt à les recevoir. En effet, les messages envoyés sont considérés inutiles et consomment une énergie additionnelle.

2.3.2.6 La taille des paquets

La taille des messages échangés dans le réseau a un effet sur la consommation d'énergie des nœuds émetteurs et récepteurs. Ainsi, la taille des paquets ne doit être ni trop élevée ni trop faible. En effet, si elle est petite, le nombre de paquets de contrôle (acquiescement) généré augmente l'*overhead*. Dans le cas contraire, une grande puissance de transmission est nécessaire pour des paquets de grande taille.

2.3.3 Modèle de propagation radio

Le modèle de propagation représente une estimation de la puissance moyenne reçue du signal radio à une distance donnée d'un émetteur. La propagation du signal radio est généralement soumise à différents phénomènes : la réflexion, la diffraction et la dispersion par divers objets. Généralement, la puissance du signal reçue est de l'ordre de $1/d_n$, où d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, n un exposant de perte d'un chemin (Exemple : $n=2$ dans le vide, de 4 à 6 dans un immeuble) [50].

2.3.4 Routage des données

Le routage dans les réseaux de capteurs est un routage multi-sauts. L'acheminement des paquets d'une source donnée à une destination se fait à travers plusieurs nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud consomme de l'énergie soit pour transmettre ces données ou pour relayer les données des autres nœuds. Dans ce contexte, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau [50].

2.4 Mécanismes de minimisation de la consommation d'énergie

Après avoir passé en revue les principales causes de pertes d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, nous présentons les différentes techniques utilisées pour minimiser cette consommation. Ces techniques sont appliquées soit au niveau de la couche liaison (sous couche MAC) ou au niveau de la couche réseau. Le schéma suivant (figure 2.2) donne un Aperçu global de ces mécanismes [14].

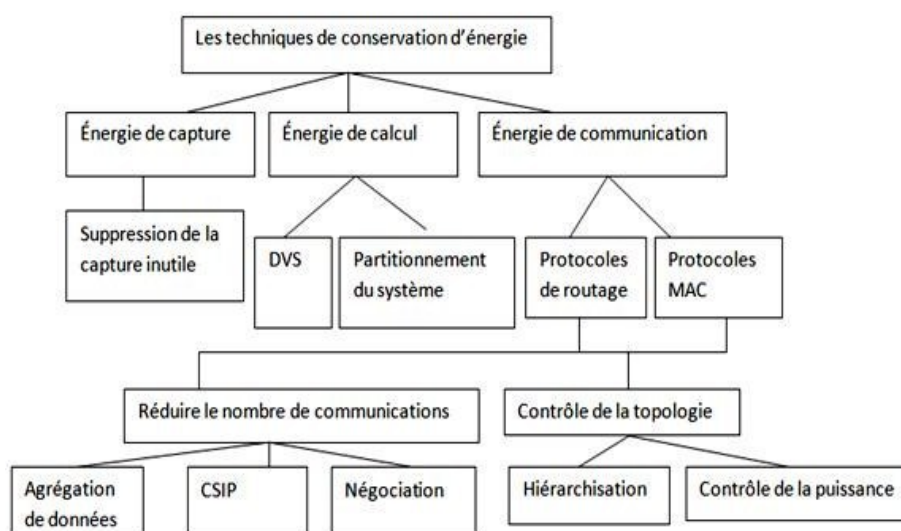


FIGURE 2.2 – Les techniques de conservation d'énergie.

L'énergie d'un capteur peut être économisée soit durant (a) la capture, (b) le traitement ou (c) durant la communication.

2.4.1 Énergie de capture

La seule solution apportée pour la minimisation de la consommation d'énergie au niveau de la capture consiste à réduire les durées de captures.

2.4.2 Energie de traitement

L'énergie de calcul peut être optimisée en utilisant deux techniques :

- L'approche DVS [51], consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence de microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances.
- L'approche de partitionnement de système, consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul [51].

2.4.3 Energie de communication

La minimisation de la consommation d'énergie pendant la communication est étroitement liée aux protocoles développés pour la couche réseau et la sous couche MAC. Ces protocoles se basent sur plusieurs techniques : agrégation de données, négociation et CSIP. Cette dernière technique est une discipline qui combine entre plusieurs domaines : la communication et le calcul à basse puissance, traitement de signal, algorithmes distribués et tolérance aux fautes, systèmes adaptatifs et théorie de fusion des capteurs et des décisions. Ces techniques ont pour but de réduire le nombre d'émission/réception des messages.

2.4.3.1 Contrôle de la topologie

Par contre, le contrôle de la topologie [53] permet l'ajustement de la puissance de transmission et le clustering des nœuds capteurs (hiérarchisation).

- Le contrôle de la puissance de transmission n'a pas seulement un effet sur la durée de vie de la batterie d'un nœud capteur, mais aussi sur la capacité de charge du trafic qui est caractérisée par le nombre de paquets transmis avec succès vers une destination. En outre, il influe sur la connectivité et la gestion de la densité (le nombre de nœuds voisins). Ainsi, il peut conserver l'énergie à deux niveaux : explicitement par l'application de puissances faibles d'émissions et implicitement en réduisant la contention avec d'autres nœuds transmetteurs.

Le module de contrôle de la puissance est souvent intégré dans des protocoles de la couche réseau ou MAC [53].

- La hiérarchisation consiste à organiser le réseau en structure à plusieurs niveaux. C'est le cas, par exemple, des algorithmes de clustering, qui organisent le réseau en groupes (*clusters*) avec des leaders de groupe (*clusterheads*) et des noeuds membres.
- Une autre solution proposée dans [14], profite de la densité élevée des capteurs déployés pour permettre d'endormir certains d'entre eux, afin que tous les capteurs ne soient pas actifs en même temps.

2.5 Contraintes liées au routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Le routage dans les réseaux de capteurs est un routage multi-sauts. L'acheminement des paquets d'une source donnée à une destination se fait à travers plusieurs noeuds intermédiaires. Ainsi, un noeud consomme de l'énergie soit pour transmettre ces données ou pour relayer les données des autres noeuds. Dans ce contexte, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau.

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil est soumis à des exigences spécifiques afin d'assurer une communication efficace, parmi ces exigences nous citons :

2.5.1 Type des protocoles

Les capteurs ont des capacités de calcul très limitées et une mémoire de stockage de petite taille. De ce fait, ils ne sont pas en mesure d'exécuter un protocole complexe. En outre, l'efficacité énergétique doit être une préoccupation principale de tout protocole conçu pour un réseau de capteurs, car ces derniers sont alimentés par des batteries de faible autonomie. Ce sont les raisons pour lesquelles un protocole localisé et distribué est toujours préférable (si ce n'est pas le seul type approprié)[52].

2.5.2 Imprécision des capteurs

La principale source de données d'un nœud capteur provient des mesures des phénomènes physiques prélevées dans la zone de surveillance. Par conséquent, les données sont sujettes à différentes sources d'erreurs. Les données du capteur peuvent être influencées par des erreurs telles que le bruit provenant de sources externes, du matériel, d'inexactitudes et d'imprécision des capteurs. En particulier, ils peuvent donner des réponses imprécises même erronées [27]. La lecture erronée survient suite à des changements des conditions d'opération (par exemple, la température, l'humidité, etc), ou d'autres facteurs tels que le vieillissement du capteur.

Le calibrage est une solution envisagée pour réduire ce type d'erreurs. En se basant sur leur type, coût et application, les précisions et l'exactitude des capteurs varient considérablement. Par exemple, l'imprécision d'un GPS dans la détermination de la position peut aller jusqu'à quelques mètres. La précision et l'exactitude de capteurs d'humidité peuvent également varier de façon significative. L'utilisation d'un grand nombre de capteurs donne plus de précision dans l'information recueillie par rapport à celle obtenue par un seul capteur [27].

2.5.3 Routage des données

Le routage est l'une des problématiques majeures dans un réseau de capteurs sans fil. Il est basé sur le principe des réseaux Ad-Hoc multi-sauts, car la communication des données est effectuée de nœud en nœud jusqu'à ce qu'elles arrivent à la destination. Une fois les données collectées, un flux énorme est généré lors de l'acheminement de ces données vers les stations de base [5].

2.5.4 Gestion des données

Un réseau de capteurs est souvent censé collecter des informations de l'environnement. Il est de l'ordre de plusieurs centaines, voir des milliers de capteurs ou plus, ainsi la quantité de données recueillies est élevée. Comment gérer, traiter et faire parvenir ces données aux stations puits, est un véritable défi. Certains sous problèmes de ce type ont été traités, tels que le traitement des données en réseau, la diffusion et l'agrégation des données [5].

2.5.5 Facteurs environnementaux

Tout au long de la durée de vie du réseau de capteurs sans fil, des changements environnementaux peuvent se produire.

Exemple : les nœuds peuvent être déplacés en raison d'une forte vitesse du vent.

De grands objets physiques peuvent être placés de sorte à interférer sur la communication entre les nœuds. Forte humidité, pluie, neige, grêle, etc, peuvent perturber les actions du système [11].

Face à ces contraintes environnementales, le système doit être capable de réagir automatiquement afin de supporter ces événements.

2.5.6 Canaux sans fil

La qualité des communications à travers un canal sans fil dépend de plusieurs paramètres. Elle peut varier de manière importante en fonction du temps, ou bien avec une faible modification environnementale. Cependant, les problèmes de la couche physique dans les réseaux de capteurs ne sont pas négligeables. Les différents problèmes de la couche réseau tels que le routage, doivent prendre en considération la modélisation du canal ou la détection et le codage. En d'autres termes, les protocoles dans un réseau de capteurs doivent étudier l'impact de la variabilité de la couche physique sur les performances du réseau. Ils doivent avoir une forte protection aux interférences et au bruit [11].

2.5.7 Qualité de service

Dans certaines applications, l'acheminement des données captées doit se faire durant une certaine période, autrement, ces informations seront inutiles. Ainsi, garantir une latence limitée dans les délais de transmission de bout en bout constitue une contrainte supplémentaire pour ce genre d'application [17]. Cependant, dans plusieurs autres applications, le facteur de consommation d'énergie est plus important que la qualité des données transmises. Pour cette raison, en cas d'affaiblissement d'énergie, le réseau peut réduire la qualité des résultats dans le but de minimiser la consommation d'énergie et prolonger ainsi la durée de vie du réseau. Pour ce faire, les protocoles garantissant la qualité de service doivent être également efficaces en consommation d'énergie afin de prendre en charge ce cas de figure.

2.5.8 Connexité

La connexité d'un réseau est indispensable pour pouvoir acheminer les informations au cours du temps jusqu'à atteindre les stations de base. Un réseau de capteurs est connexe si tout capteur actif peut atteindre une station puit, éventuellement par des communications multi-sauts.

2.5.9 Couverture

Dans les RCSFs, chaque nœud capteur a une vue restreinte et limitée de l'environnement surveillé. Par conséquent, la couverture d'une région est un paramètre de conception important dans les RCSFs. [18]

2.6 Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs

Les caractéristiques des réseaux de capteurs, comme la densité importante des nœuds, leur capacité énergétique limitée et la topologie qu'ils forment, exigent des protocoles de routage spécifiques, différents de ceux déployés dans les réseaux usuels. De ce fait, le développement de nouveaux protocoles de routage s'avère nécessaire pour choisir une route optimale. Beaucoup de protocoles de routage ont été proposés pour les RCSFs. Ces derniers prennent en compte plusieurs facteurs, notamment la conservation d'énergie et la topologie dynamique des RCSFs. Le principe de fonctionnement de ces protocoles, diffèrent suivant la classification à laquelle ils appartiennent. Ces classes peuvent être distinguées suivant : la structure du réseau, les fonctions du protocole, la méthode d'établissement des routes et l'initiateur de la communication [2].

2.6.1 Selon le type du protocole

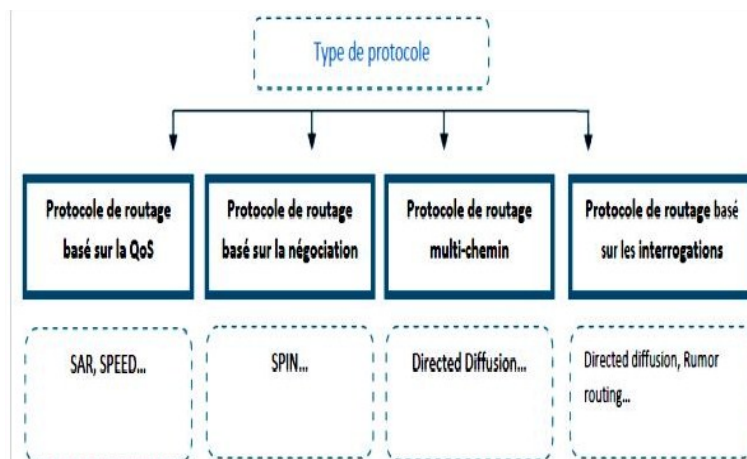


FIGURE 2.3 – Les protocoles de routage selon le type de protocole

2.6.1.1 Protocoles de routage multi-chemin

Ils se basent sur l'adoption de plus qu'un chemin menant vers la destination, et ce, pour avoir des chemins de secours si jamais le chemin principal serait rompu.

2.6.1.2 Protocoles de routage basés sur la négociation des données

En détectant le même phénomène, les nœuds capteurs inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. En effet, avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation spéciales, appelés *meta-DATA*. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent des mêmes données à transmettre [3]. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données.

2.6.1.3 Protocoles de routage basés sur les interrogations

La collecte des informations sur l'état de l'environnement est initiée par des interrogations envoyées par le nœud puit [2].

2.6.1.4 Protocoles de routage basés sur la QoS

Ce type de protocoles tend à satisfaire certaines métriques, pendant la transmission des données vers la destination finale. Parmi ces métriques, nous citons : le délai de bout en bout, la gigue, PDR, énergie consommée...etc

2.6.2 Selon la structure de réseau

Parmi les protocoles de routage pour les réseaux de capteurs basant sur la structure de réseau déployée, on distingue les protocoles de routage hiérarchique, plat et par localisation.

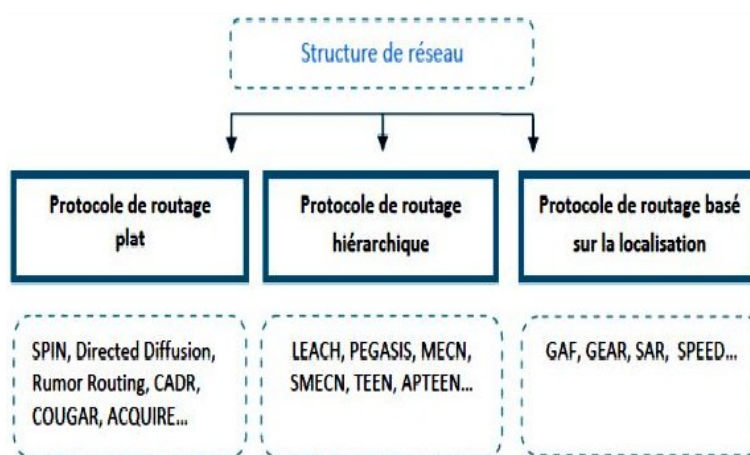


FIGURE 2.4 – Les protocoles de routage selon la structure de réseau

2.6.2.1 Les protocoles de routage plat (flat based-routing)

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

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

SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation) est une famille de protocoles proposé par Heinzelman et al. L'idée derrière le **SPIN** est d'échanger des informations sur les données à

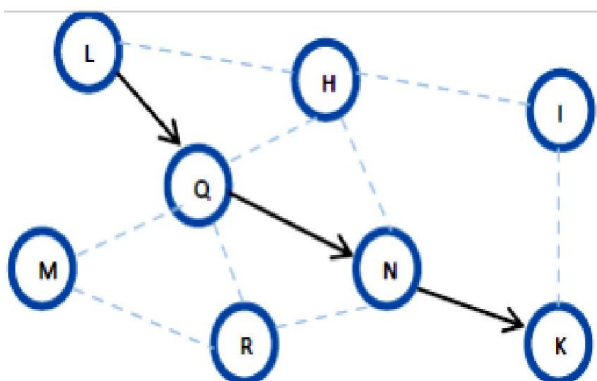


FIGURE 2.5 – Routage plat

envoyer en utilisant des paquets de signalisations spéciales nommées *meta-DATA*. Ceci permet d'éviter le problème des données redondantes. Chaque nœud, s'intéressant à la donnée référencée par ce paquet meta-DATA, peut les récupérer en envoyant un paquet de requête. En effet, l'implosion et le chevauchement sont évités à l'aide d'un mécanisme de négociation entre les capteurs avant la transmission.

Les communications dans **SPIN** se font en trois étapes :

- Lorsqu'un nœud veut émettre une donnée, il émet d'abord un message ADV contenant une description de la donnée en question.
- Un nœud recevant un message ADV, consulte sa base d'intérêt. S'il est intéressé par cette information, il émet un message REQ vers son voisin.
- En recevant un message REQ, l'émetteur transmet à l'intéressé la donnée sous forme d'un message DATA [2,3,17].

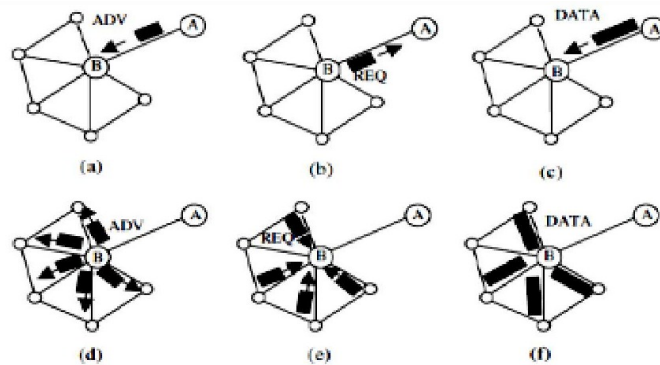


FIGURE 2.6 – Fonctionnement du protocole SPIN

2. *DD (Directed Diffusion)*

Le protocole *Directed Diffusion* est simple dans son principe. Le nœud "Sink" commence à envoyer, vers tous les nœuds, un message *Interest* pour démarrer une application bien déterminée. Ce paquet sera acquitté par un autre appelé *gradient*. Un gradient est un lien de réponse de la part du voisin recevant l'intérêt. En utilisant les intérêts et les gradients, plusieurs chemins peuvent être établis entre le "Sink" et la source. L'un de ces chemins est sélectionné par renforcement. Si ce chemin échoue un nouveau ou un alternatif doit être identifié [14].

3. *Flooding*

La technique d'inondation (flooding) est une technique classique qui peut être utilisée pour le routage dans les réseaux de capteurs. Dans cette approche, chaque nœud recevant une donnée ou un paquet de contrôle le diffuse à tous les nœuds voisins jusqu'à ce que le nombre maximum de sauts pour ce paquet soit atteint ou le paquet arrive à sa destination.

L'inondation est une technique réactive qui ne nécessite pas une maintenance coûteuse de la topologie du réseau, ni des algorithmes complexes pour la découverte des routes, mais elle présente plusieurs inconvénients, entre autres :

- *L'implosion* : cette situation parvient si des messages dupliqués sont envoyés au même nœud. Par exemple si un nœud capteur A possède n nœuds capteurs voisins qui sont également voisins

du nœud B, ce dernier recevra n copies du message envoyé.

- *Le chevauchement* : si deux nœuds observant la même région sont stimulés en même temps, leurs nœuds voisins recevront des messages dupliqués.
- Ignorance des ressources : la technique d'inondation ne prend pas en compte les ressources d'énergie disponibles. Cependant, un protocole efficace d'énergie doit prendre en compte à chaque instant la quantité d'énergie disponible [18].

4. *Gossiping*

Dans cette technique, dérivée de la technique d'inondation, le nœud ne diffuse pas les messages reçus à tous ses voisins, mais il les transmet à un seul, sélectionné aléatoirement. En effet, chaque nœud capteur dans le réseau sélectionne aléatoirement un nœud parmi ses voisins pour lui transmettre les données reçues, une fois que le nœud voisin reçoit ces données, il choisit un autre nœud d'une façon aléatoire pour lui transmettre ces données à son tour.

Bien que cette approche évite le problème d'implosion en ayant une seule copie du message au niveau de chaque nœud, elle ne prend pas en compte la limitation énergétique et prend beaucoup plus de temps pour propager les messages dans tout le réseau [18].

2.6.2.2 Les protocoles de routage hiérarchiques

Ces protocoles fonctionnent en confiant des rôles différents aux nœuds du réseau. Certains nœuds sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières. Un nœud peut être, par exemple, une passerelle pour un ensemble de nœuds. Dans ce cas, le routage devient plus simple, puisqu'il s'agit de passer par les passerelles pour atteindre le nœud destination qui lui est directement attaché.

Un exemple est donné dans la figure 2.7 :

Pour que les paquets générés par le nœud F atteignent le nœud L, ils doivent passer par les passerelles P, S et R.

Le principe des protocoles de routage hiérarchique est basé essentiellement sur les nœuds passerelles. En fait, les nœuds ordinaires savent que si le destinataire n'est pas dans leur voisinage direct, il suffit d'envoyer la requête à la passerelle qui la prendra en charge. À son tour, elle transmettra cette requête vers le nœud ciblé. Ce type de routage présente de nombreux avantages pour les réseaux dont leurs nœuds sont sédentaires et disposent de suffisamment d'énergie [2].

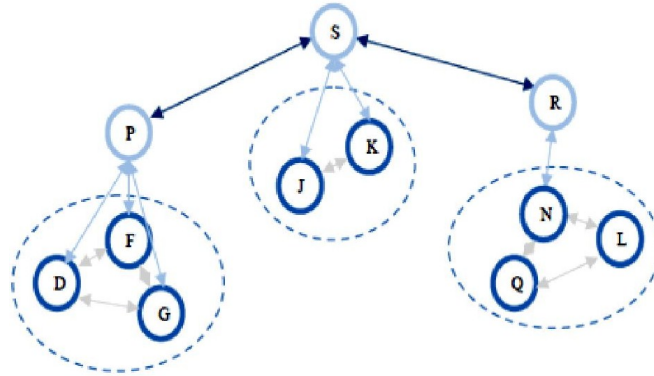


FIGURE 2.7 – Routage hiérarchique

1. *LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)*

LEACH [19] est l'un des premiers protocoles de routage hiérarchiques proposés pour les réseaux de capteurs. Dans ce protocole, les nœuds s'organisent en clusters. Dans chaque cluster, un nœud est élu en tant que Cluster-Head (CH) et tous les autres nœuds du réseau transmettent leurs données à ce dernier. Par ailleurs, chaque CH qui reçoit les données transmises par les membres du groupe, effectue des agrégations sur ces données, et envoie les résultats au puit. De ce fait, un CH doit posséder plus d'énergie que les nœuds membres.

Le principe de LEACH peut se résumer comme suit :

- Initialement un nœud décide d'être un CH et diffuse sa décision aux autres nœuds du réseau.
- Ensuite, chaque nœud qui n'est pas CH doit déterminer son cluster en choisissant le cluster dont CH est le plus proche dans son voisinage.
- Les CHs sont réélus périodiquement afin d'équilibrer leur charge. La réélection des CHs est effectuée comme suit : chaque nœud i génère un nombre aléatoire entre 0 et 1, et devient un CH si le nombre est inférieur au seuil suivant :

$$T(i) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{si } i \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Où :

p : pourcentage de CHs désiré dans la population du capteur.

r : la période au cours de laquelle un nœud a pris le rôle de CH.

G : l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été élus CHs lors des 1/P périodes précédentes.

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

PEGASIS est une amélioration du protocole LEACH. Au lieu de former plusieurs clusters, PEGASIS forme des chaînes de nœuds de sorte que chaque nœud transmet et reçoit du nœud voisin appartenant à la chaîne. Un seul nœud est choisi, parmi cette chaîne, pour transmettre au puits. Ce nœud est nommé " *leader node* ". Les données recueillies se déplacent d'un nœud à un autre, et seront agrégées puis envoyées au puits par le nœud leader. Dans le PEGASIS hiérarchique les nœuds construisent une chaîne qui forme un arbre hiérarchique. Chaque nœud leader, choisi dans un niveau particulier, transmet des données aux nœuds du niveau supérieur de la hiérarchie jusqu'à atteindre la station de base puits. [2,18]

3. *HEED (Hybrid Eenergy-Efficient Distributed approach)*

Les auteurs de cet article [20] ont proposé un algorithme de clustering distribué appelé HEED pour les réseaux de capteurs. Contrairement aux techniques précédentes, *HEED* ne fait aucune restriction sur la distribution et la densité des nœuds. Il ne dépend pas de la topologie du réseau ni de sa taille mais il suppose que les capteurs ont la possibilité de modifier leur puissance de transmission. *HEED* sélectionne les cluster-heads selon un critère hybride regroupant l'énergie restante des nœuds et un second paramètre tel que le degré des nœuds. Il vise à réaliser une distribution uniforme des clusters heads dans le réseau et à générer des clusters équilibrés en taille. Un nœud u est élu comme cluster head avec une probabilité P_{ch} égale à :

$$P_{ch} = C_{prob} \times \frac{E_n}{E_{total}}$$

Où E_n est l'énergie restante du nœud n , E_{Total} est l'énergie globale dans le réseau et C_{prob} est le nombre optimal de clusters. Cependant, l'évaluation de " E_{Total} " présente une certaine difficulté, à cause de l'absence de toute commande centrale. Un autre problème réside dans la détermination du nombre optimal de clusters. De plus, *HEED* ne précise pas de protocole particulier à utiliser pour la communication entre les clusters heads et le sink. A l'intérieur du cluster, le problème ne se pose pas car la communication entre les membres du cluster et le cluster head est directe (à un saut). D'autre part, avec *HEED*, la topologie en clusters ne réalise pas de

consommation minimale d'énergie dans les communications intra-cluster et les clusters générés ne sont pas équilibrés en taille.

4. **VCA (An Energy-Efficient Voting-Based Clustering Algorithm for Sensor Networks)**

Le protocole VCA [22] réalise une sélection de routeurs de clusters de manière distribuée : seule la connaissance des énergies résiduelles des capteurs du voisinage est nécessaire. Le principe de protocole est le suivant :

◇ **Calcul du score énergétique** : la fonction de poids utilisée pour la sélection d'un cluster Head est l'énergie résiduelle du capteur. Chaque capteur i diffuse sa valeur d'énergie résiduelle e_i à son voisinage et calcule pour chaque voisin j une note relative à l'énergie résiduelle envoyé par ce dernier.

$$Note_{i,j} = \frac{e_j}{\sum_{k \in V_i} e_k}$$

Où :

V_i est l'ensemble des voisins du capteur i .

Par la suite, chaque capteur diffuse les notes calculées à ses voisins et détermine son score énergétique par la somme des notes calculées par ses voisins.

◇ **Auto-désignation du cluster-Head** : Chaque capteur compare son score énergétique avec celui de ses voisins : si celui-ci est plus élevé, alors il s'auto-désigne comme cluster-Head. Ainsi au sein d'un cluster, le capteur qui dispose de la plus haute énergie résiduelle, est nécessairement celui assurant le rôle de cluster-Head.

◇ **Choix du cluster-Head** :

A cet effet, durant la phase d'initialisation, le protocole VCA associe à chaque capteur une valeur de fitness. Un capteur choisit le cluster-Head présentant une valeur de fitness maximale. Une première approche pour l'équilibrage de charge du cluster-Head consiste à utiliser la fonction de fitness suivante :

$$fitness(i) = \frac{1}{card(V_i)}$$

Un capteur non attaché choisit donc de rejoindre le cluster dont le cluster-Head a un nombre de voisin plus faible.

Une autre approche (équilibre par énergie résiduelle), vise à maximiser la durée de vie du réseau. En l'occurrence, il apparaît intéressant qu'un capteur non attaché privilégie son rattachement au cluster-Head disposant de la durée de vie ayant une valeur d'énergie la plus importante. La fonction de fitness suivante est alors proposée :

$$fitness(i) = \frac{e_i}{card(v_i)}$$

Où :

$Card(V_i)$ représente le nombre de voisin du capteur i .

e_i représente l'énergie résiduelle du capteur.

D'après les tests réalisés, le protocole VCA est efficace pour réduire le nombre de cluster-Head et augmenter l'autonomie d'un réseau de capteurs par rapport à d'autres protocoles existants tels que HEED [20].

5. ***PBEEC (Prediction-based Energy Efficient Clustering Approach for Wireless Sensor Networks)***

Dans ce travail [23], les auteurs proposent une méthode de prédiction pour estimer la consommation d'énergie du nœud basée sur une approche de clustering . Seuls les nœuds qui ont une énergie résiduelle élevée peuvent être sélectionnés comme cluster-head.

Les hypothèses

Le modèle utilisé dans cet article [23] permet d'émettre les hypothèses suivantes : dans ce modèle les capteurs sont considérées comme immobiles. Donc, la topologie du réseau change principalement en raison de défaillances de nœuds et de l'épuisement de l'énergie.

- Il n'y a qu'une seule station de base (SB) qui se trouve en dehors du réseau chargée de collecter des données à travers le réseau.
- Chaque nœud possède la capacité d'agréger les données.
- Chaque nœud a un nombre fixe de niveaux de puissance de transmission pour faire varier la puissance d'émission.

Le modèle d'énergie utilisé est le suivant :

$$E_r(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\xi_{fs}d^2 & \text{si } d < d_0 \\ kE_{elec} + k\xi_{mp}d^4 & \text{si } d \geq d_0 \end{cases}$$

Ces équations permettent de calculer la quantité d'énergie consommée lors de la transmission $E_r(k, d)$ et la réception $E_r(k, d)$ d'un paquet de k bits sur une distance d .

Où :

E_{elec} : Représente l'énergie électrique.

ξ_{fs} et ξ_{mp} indiquent la dissipation de l'énergie de l'amplificateur de l'émetteur dans le modèle d'espace libre et l'énergie d'amplification, respectivement.

- Les résultats de simulation prouvent que la démarche de clustering est économe en énergie.

2.6.2.3 Les protocoles de routage avec localisation géographique

Un routage est dit géographique lorsque les décisions de routage sont basées sur la position des nœuds. Les pré requis pour effectuer un routage géographique dans un RCSF sont :

- Tous les nœuds possèdent un moyen de localisation, soit un système natif comme le GPS, soit un système logiciel comme un protocole de localisation.
- Un nœud source connaît toujours la position du nœud destinataire. Pour ce faire, soit tous les nœuds connaissent les positions initiales de tous les nœuds, soit un service de localisation doit être utilisé.

On distingue trois principales décisions de routage géographique, qui dépendent, soit de la progression, soit de la distance, soit de la direction.

Dans ce qui suit, nous expliquons ces prises de décision par l'étude de l'exemple donné par la figure 2.10. Nous supposons que le nœud source S désire transmettre des informations vers le nœud D [6,7].

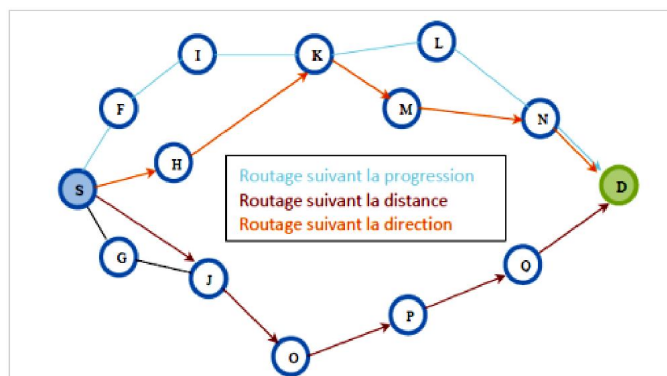


FIGURE 2.8 – Routage basé sur la localisation

- **Suivant la progression** : la progression d'un nœud correspond à sa projection sur l'axe (SD). Le nœud dont la projection est la plus proche de la destination est choisi comme prochain nœud. Suivant la figure 2.8, le chemin résultant sera celui défini par les nœuds SF I K L N et D.

- ◊ **Suivant la distance** : le nœud le plus proche de la destination D en termes de distance est choisi comme prochain nœud. Dans notre cas de figure, c'est le nœud J qui est sélectionné. La route de S à D passe par les nœuds J O P Q. Dans ces approches, on cherche à minimiser le nombre de sauts.

- **Suivant la direction** : le nœud voisin le plus proche de la droite (SD) en direction de D est choisi. Le nœud H est pris comme prochain nœud et le chemin entre S et D est S H K M N D. On minimise dans ce cas la distance réelle parcourue par les messages entre les nœuds S et D.

Une variante de cette approche est de considérer tous les nœuds en direction de la destination appartenant à un cône dirigé vers D [7]. Il existe plusieurs protocoles de routage géographiques parmi ces derniers :

1. **GAF (Geographic adaptive fidelity)**

Le protocole *GAF* conserve l'énergie par la mise en veille des nœuds inutiles dans le réseau sans affecter le niveau de fidélité du routage. Il forme une grille virtuelle pour le domaine couvert. Chaque nœud emploie sa position indiquée par le *GPS* pour s'associer à un point dans la grille

virtuelle. Des nœuds liés au même point sur la grille sont considérés équivalents en termes de coût de routage. Une telle équivalence est exploitée en maintenant quelques nœuds situés dans un secteur particulier de la grille dans l'état de sommeil afin d'économiser de l'énergie [3].

2. *SAR (Sequential Assignment Routing)*

SAR est une approche multi-chemins qui s'efforce à réaliser l'efficacité énergétique et la tolérance aux fautes. *SAR* crée des arbres en prenant en compte les métriques de QoS, la ressource énergétique sur chaque chemin et le niveau de priorité de chaque paquet. En utilisant ces arbres, des routes multiples du puits aux capteurs sont formés. Une ou plusieurs routes peuvent, alors, être empruntées [3].

3. *SPEED*

Ce protocole exige que chaque nœud maintienne des informations sur ses voisins. Il procède par un routage géographique pour sélectionner les nœuds de prochains sauts jusqu'à arriver à la destination finale puits. En outre, *SPEED* assure une vitesse de livraison des paquets constante, appelée *Setspeed*. Ceci permet de garantir des délais de livraison de bout en bout acceptables. Ces délais peuvent être estimés en divisant la distance séparant le nœud source du *sink* par la vitesse *setspeed* [3].

2.6.3 Protocoles de routage selon la méthode d'établissement de routes

Suivant la manière de création et de maintenance des routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en catégories : protocoles proactifs, réactifs ou hybrides.

2.6.4 Protocoles de routage selon l'initiateur de communication

La communication dans un réseau de capteur peut être initiée par un nœud source ou un nœud destination [18].

2.6.4.1 Initiation des communications par les nœuds sources

Dans un protocole où la communication est initiée par un nœud source, les nœuds envoient des données à la station de base quand ils détectent une variation sensible des paramètres à surveiller. Ces protocoles utilisent des modèles de livraison de données dirigés par les événements ou dirigés par le temps (périodiques). Soit la donnée est envoyée à intervalle de temps réguliers ou alors elle est envoyée quand les nœuds capturent une certaine valeur (détection d'un évènement) [18].

2.6.4.2 Initiation des communications par les nœuds destination

Les protocoles où la communication est initiée par les destinations, utilisent un modèle de livraison de données basé sur les requêtes. Les nœuds sources répondent aux requêtes envoyées par la station de base. Il ya un surcout dans ce type de protocoles puisque les requêtes sont d'abord diffusées dans tout le réseau. Donc à chaque fois il y a une requête il y a un flooding de tout le réseau (inondation de tout le réseau) [17].

2.7 Conclusion

Contrairement aux réseaux traditionnels qui se préoccupent de garantir une bonne qualité de service, les réseaux de capteurs doivent, en plus, donner de l'importance à la conservation d'énergie. Ils doivent intégrer des mécanismes qui permettent aux utilisateurs de prolonger la durée de vie du réseau en entier, car chaque nœud est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable. Dans un nœud capteur, l'énergie est consommée en assurant les fonctions suivantes : la capture, le calcul (traitement) et la communication. Plusieurs facteurs interviennent dans ces fonctions : l'état du module radio, la politique d'accès au canal de transmission, le protocole de routage etc.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter quelques stratégies MIMO coopératives proposées pour les RCSFs, et cela dans le but de maximiser la durée de vie du réseau.

Chapitre 3

Stratégies MIMO coopératives proposées pour les RCSFs

3.1 Introduction

La transmission d'information entre les capteurs ne peut pas être assurée directement entre tout couple de capteurs, vu leur batterie limitée (qui entraîne une limite des puissances de transmissions des capteurs). L'information est donc transmise de proche en proche. Les trois fonctions principales (mesure, traitement et communication de l'information) du capteur engendrent une consommation d'énergie. De ce fait, le capteur a une durée de vie limitée.

Parmi les techniques innovantes permettant d'économiser l'énergie ainsi que d'augmenter le débit ou la robustesse du lien dans les RCSFs, les techniques multi-émetteurs, multi-récepteurs plus connues sous l'acronyme MIMO sont apparues il y a quelques années. Elles reposent sur l'utilisation conjointe de réseaux d'antennes à l'émission et à la réception. Elles remédient aux problèmes de consommation d'énergie. Ces techniques exploitent de façon conjointe la dimension temporelle ou fréquentielle des signaux et la dimension spatiale apportée par l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception. Les méthodes de traitement des signaux utilisées exploitent ces différentes dimensions ce qui permet d'atteindre des efficacités spectrales beaucoup plus importantes qu'avec des systèmes traditionnels SISO.

Dans ce chapitre, après une description de la technique MIMO, nous présenterons les principales solutions proposées dans la littérature basées sur les technologies MIMO pour la gestion de la consom-

mation de l'énergie.

3.2 La technique MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Dans un système mono-antenne, l'augmentation de la taille de la modulation ou de la bande de fréquence utilisée sont les seules solutions pour augmenter le débit de données, avec tous les problèmes de complexité ou d'encombrement que cela entraîne.

Les systèmes MIMO présentent un vaste champ d'étude. Dans la littérature, ces systèmes, pouvant exploiter la diversité (voir 3.2.2), font l'objet de nombreux travaux dans le but d'améliorer la qualité de la transmission à travers les canaux radio.

3.2.1 Modèle de système MIMO

L'idée de base des systèmes MIMO est très simple puisqu'il s'agit d'associer la diversité spatiale à l'émission à la diversité spatiale à la réception (voir 3.2.2). Il s'agit en quelque sorte d'une extension des "antennes intelligentes". Les deux principaux types d'antennes intelligentes sont :

3.2.1.1 Antennes à commutation de faisceaux " switched beam antenna systems " :

Ces antennes détectent la qualité du signal reçu, choisissent parmi un des multiples lobes prédéterminés et commutent d'un rayon à un autre en fonction du mouvement de l'utilisateur.

3.2.1.2 Antennes adaptatives " adaptive antennas " :

Il s'agit de la technique la plus avancée de nos jours en ce qui concerne les antennes intelligentes. Son principe est de diriger le lobe principal de son diagramme de rayonnement en direction du signal attendu [25].

Les avantages des systèmes à antennes intelligentes sont les suivants :

- **Pour de meilleurs résultats** : en termes de capacité, de qualité de service et de coûts en déploiement.
- **Réduction des interférences** : surtout en milieu urbain.

- **Une meilleure portée** : donc une zone de couverture plus large.

Les limites fondamentales des systèmes MIMO en termes de capacité sont approchées si les signaux transmis par les différentes antennes sont orthogonaux et si la répartition de l'énergie sur ces dernières est uniforme. De ces études sont nées différentes architectures spatio-temporelles unitaires ou différentielles [24].

3.2.2 la Diversité

Transmettre des répliques de l'information indépendamment en utilisant plusieurs signaux en même temps sur différent trajets, il existe deux types :

- Diversité à l'émission : pour garantir la diversité en absence de CSI.
- Diversité à la réception : pour avoir une variabilité d'amplitude plus faible.

3.2.3 Architecture de Codes spatio-temporels

Ce codage spatio-temporel (CST), dont l'architecture générale est présentée sur la figure 3.1 ajoute donc de la redondance aux données binaires émises afin d'augmenter la diversité spatiale et éviter les évanouissements propres au canal radio-mobile [10].

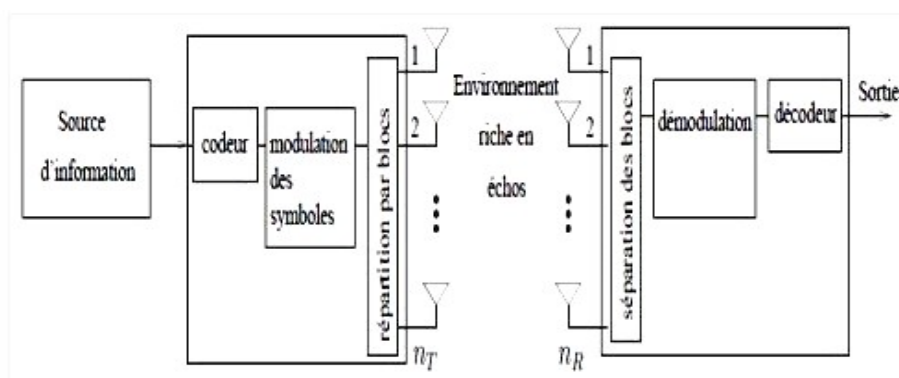


FIGURE 3.1 – Architecture d'un système de codage spatio-temporel

Dans cette catégorie de codage on distingue les deux sous catégories suivantes :

3.2.3.1 Codage spatio-temporel en treillis (CSTT)

Proposé originellement par Tarokh et al, des laboratoires de recherche AT & T, ils combinent le codage de canal avec la modulation sur les antennes émettrices.

Le CSTT crée des relations entre les signaux à la fois dans l'espace (plusieurs antennes émettrices) et dans le temps (symboles consécutifs). Le codeur est composé de nT polynômes générateurs qui déterminent les symboles émis simultanément [8,10].

3.2.3.2 Codes spatio-temporels par blocs

Permet d'envoyer des signaux différents sur chaque antenne. Le principe du STBC est d'introduire une redondance d'information entre les deux antennes. Chaque sous canal est un canal à évanouissement indépendant, ce qui fait que le STBC augmente la diversité du canal (donc la qualité du lien radio) de transmission et donc la robustesse du récepteur.

Cette méthode est très attractive car elle n'exige pas la connaissance de l'état du canal (CSI) même si cela peut réduire la capacité de transmission des données. Le gain de diversité résultant améliore la fiabilité des liaisons sans fil à évanouissement et améliore la qualité de la transmission. Il est à noter que ce type de codage n'améliore pas la capacité de transmission linéairement avec le nombre d'éléments utilisés.

Parmi les codes de STBC nous citons, les systèmes MIMO STBC orthogonaux qui présentent un compromis optimal entre diversité (donc qualité du lien radio) et débit.

Ils utilisent des symboles complexes issus d'une constellation codée à la fois en espace (plusieurs antennes d'émission) et en temps (redondance) suivant une matrice de codage G propre à chaque type de code.

La matrice $G \in \mathbb{C} (p \times nt)$ et ses colonnes sont orthogonales les unes par rapport aux autres au sens du produit scalaire :

$$\mathcal{A} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{p1} & g_{p2} & \cdots & g_{pn} \end{pmatrix}$$

Dont chaque entrée $g_{k,j}$, $1 \leq k \leq p$, $1 \leq j \leq n_t$, est une combinaison linéaire des symboles $\{d_n\}_n^N$ et de leur conjugué. A chaque instant k , le vecteur signal $\{g_{k,j}\}_j^{n_t}$ est transmis au moyen des n_t antennes d'émission. Pour transmettre N symboles il faut une durée équivalente à p symboles. Le taux de codage du système se définit donc par $R_c = N/p$ et il est nécessairement inférieur à 1 si l'on veut garder l'orthogonalité des codes pour une taille de système supérieure à 2 [25,26].

3.2.4 Codage canal

Le codage canal est une opération faite au niveau du transmetteur qui a pour but de fournir de la redondance sur les données à transmettre à travers le canal de communication.

Dans cette section nous introduisons la notation et le formalisme des deux types de codage canal : les codes en blocs et les codes linéaires.

1) Codes en bloc : est l'un des codes détecteurs d'erreurs, si le bloc est composé de deux parties distinctes (information utile et information de contrôle) le code est dit *systematique*.

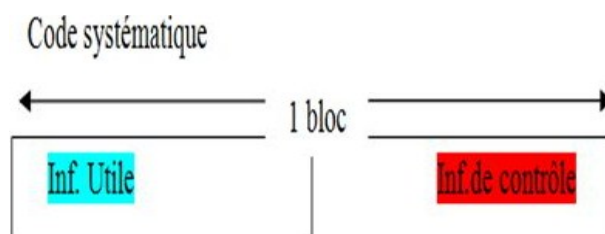


FIGURE 3.2 – Code en blocs

2) *Codes linéaires* : un code linéaire est un code en bloc dans lequel les bits de contrôle dépendent linéairement des bits d'information.

3.3 Techniques MIMO pour la minimisation de la consommation d'énergie dans les RCSFs

3.3.1 Energy Efficient Virtual MIMO-based Cooperative Communications for Wireless Sensor Networks

Dans cet article [30] les auteurs ont proposé une nouvelle architecture MIMO virtuelle basée sur la coopération pour limiter la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Vu que dans les techniques MIMO un circuit émetteur-récepteur complexe peut être intégré et une puissance de traitement du signal importante qui peuvent conduire à une consommation d'énergie importante.

3.3.1.1 Les hypothèses

Le modèle utilisé dans cet article permet d'émettre les hypothèses suivantes :

- Une bande étroite.
- Evanouissement du signal uniforme.
- Lien de communication reliant deux nœuds capteurs.
- Le signal est transmis en claire
- Le modèle utilisé est Rayleigh fading plat.
- Le schéma utilisé est le schéma Alamouti avec plus de 2 antennes à l'émission.
- Les nœuds capteurs dans un réseau de capteurs sans fil peuvent être de petite taille donc il peut ne pas être réaliste pour ces nœuds capteurs d'avoir plusieurs antennes.

Prenons un ensemble de nœuds qui collecte de données pour les envoyer à la station de base, la proposition d'une nouvelle technique virtuelle MIMO se résume dans les deux phases suivantes :

E1) communications locales à l'émission : chacun de ces capteurs, qui sont supposé être proche de chacun des autres envoient leurs données aux autres nœuds dans le cluster en utilisant une répartition dans le temps d'accès. À la fin de cette étape chaque nœud collecte de données de tous les nœuds dans

le cluster. Sachant que chaque collection de données correspond à une antenne d'émission distincte dans un système multiples antennes à l'émission.

E2) communications vers un autre cluster : les données d'un capteur correspondent à une transmission particulière.

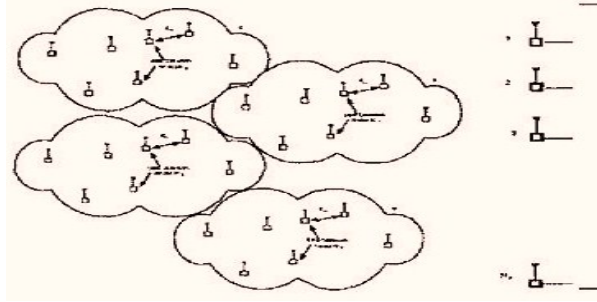


FIGURE 3.3 – Une communication MIMO-coopérative

Donc l'énergie totale requise afin de communiquer les données à tous les nœuds est donnée par :

$$E^{MIMO} = \sum_{i=1}^{N_T} L_i \overline{E}_i^T + \overline{E}^l \sum_{i=1}^{N_T} L_i$$

Où :

\overline{E}_i^T : est l'énergie moyenne par bit lors de la communication locale entre les capteurs.

\overline{E}^l : C'est l'énergie moyenne consommée par bit lors d'une communication entre deux clusters.

L_i : nombre de bits à transmettre.

N_t : nombre de nœuds à l'émission.

N_r : nombre de nœuds à la réception.

Au cours de la communication locale du capteur i , pour $i = 1, \dots, N_T$, d'autres $N_T - 1$ nœuds capteurs agissent tous comme récepteurs. Ainsi, la consommation d'énergie dans ce cas consiste à celle de l'émetteur et celle de $N_T - 1$ récepteurs :

$$P_{i,c}^T \approx (P_{DAC} + P_{mix} + P_{file} + P_{synth}) + (N_T - 1)(P_{LNA} + P_{mix}P_{IFA} + P_{file} + P_{ADC} + P_{synth})$$

L'énergie consommée par les amplificateurs de puissance lors des communications locales est :

$$P_{i,PA}^T = (1 + \alpha^T_i)P_{i,out}^T \text{ pour } i : \text{ allant de } 1, \dots, N_T$$

Des résultats de simulations ont montré que le système virtuel MIMO assure 50% d'économie d'énergie par rapport au SISO traditionnelle en fonction de la transmission à longue distance (d= 44 mètre) (entre deux clusters).

3.3.2 Virtual MIMO-Based Cross-Layer Design for Wireless Sensor Networks

Dans cet article [34], les auteurs proposent un nouveau protocole de communication MIMO virtuelle multi-saut pour améliorer conjointement l'efficacité d'énergie et la fiabilité. Dans ce protocole, la traditionnelle faible consommation d'énergie du protocole de clusterisation hiérarchique est améliorée en intégrant une communication MIMO coopérative multi-saut. L'architecture du système de référence du protocole MIMO multi-saut virtuelle est proposée dans la Fig. 3.4, où les bits de données collectées par plusieurs nœuds source sont transmis à une distance en passant par plusieurs sauts. Lors de la transmission, les nœuds capteurs seront organisés en clusters noté k_c .

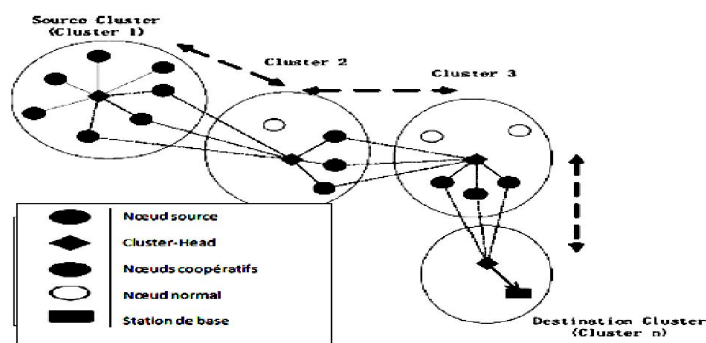


FIGURE 3.4 – Le protocole Multi-saut MIMO virtuel

La transmission dans chaque saut peut être divisée en deux opérations principales :

- La première, le CH diffusera les bits de données pour les nœuds coopératifs (CNs) dans le cluster-local. Un bruit blanc gaussien additif (AWGN) du canal existe dans une telle transmission en raison de la courte portée de transmission.

- Puis, les CNs codent et transmettent les bits de données au CH vers le prochain saut suivant la technique STBC- Orthogonale.

3.3.2.1 Les hypothèses

- Une fréquence non sélective lente du canal de Rayleigh fading avec Kth perte de la puissance lors d'un trajet dans une transmission.
- BPSK est utilisé comme le schéma de modulation en raison de son efficacité dans le MIMO-virtuel.
- Les nœuds transmettent des données vers un CH (le cluster récepteur) par le système coopératif MIMO.

3.3.2.2 Stratégie de sélection des nœuds de coopération

Dans ce protocole, l'atténuation moyenne du signal entre chaque nœud coopératif (NC) et nœuds émetteurs (t) peut être estimée au cours de la formation des clusters. La consommation moyenne d'énergie par transmission de bit par BPSK dans un tel régime peut être approximativement comme suit :

$$E_{bt} = (1 + \alpha) \frac{N_0}{P_b^{\frac{1}{j}}} \sum_{j=1}^J \frac{(4\pi)^2 d^{k,j}}{G_t G_r \lambda^2} M_l N_f + \frac{(JP_{ct} + P_{cr})}{B} \dots\dots\dots (1)$$

Où :

- α : est le rendement de l'énergie de l'amplificateur.
- N_0 : est la densité de puissance spectrale du bruit.
- M_l : est la bande de liaison.
- N_f : est le bruit (échantillon) reçu par l'antenne f.
- G_t : représente les composantes des gains de l'antenne de l'émetteur ;
- G_r : les composantes des gains de l'antenne du récepteur ;
- λ : est la longueur d'onde porteuse.
- P_{ct} et P_{cr} sont l'énergie consommée du circuit à l'émission et à la réception, respectivement.
- P_b : représente la latence et le débit de traitement des paquets de données.

La puissance du signal reçu dans le nœud j est P_{jt} , peut être décrite par :

$$P_{jt} = P_{out} \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\Pi^2) d_j^{k_j} M_l N_f} = \frac{P_{out}}{G(d_j, k_j)} \dots \dots \dots (2)$$

Où :

$$G(d_j, k_j) = P_{out} / P_{jt} = M_l N_f (4\Pi)^2 d_j^{k_j} / (G_t G_r \lambda^2)$$

D'après (1) :

$$E_{bt} = (1 + \alpha) \frac{N_0}{P_b^{\frac{1}{j}}} \sum_{j=1}^J G(d_j, k_j) + \frac{JP_{ct} + P_{cr}}{B} \dots \dots \dots (3)$$

D'après (3), l'énergie de transmission entre nœuds j et CH_t est :

$$P_{outjt} = G(d_j, k_j) \frac{N_0 B}{P_b^{\frac{1}{j}}} \dots \dots \dots (4)$$

Tel que :

B : est la bande passante.

Le E_{bt} peut être minimisé par le choix d'un approprié ensemble de CNs, dont $G(d_j, k_j)$ minimal. Pour équilibrer la consommation d'énergie les autres ont considéré :

$B_{jt} = E_j / G(d_j, k_j)$ comme critère de sélection. Où E_j est l'énergie résiduelle et d_j la distance entre le CH et CNs.

⇒ Le raisonnement derrière un tel critère est que le nœud, qui nécessite moins d'énergie pour communiquer avec CH t à une plus grande E_j , devrait avoir une plus grande chance d'être sélectionné comme CN (nœuds coopératifs).

⇒ Par conséquent, les nœuds J avec β_{jt} maximale seront choisis comme CNs (nœuds coopératifs) pour communiquer avec CH_t .

3.3.2.3 Protocole de conception

La conception du cluster est basée sur le protocole MIMO multi-saut virtuelle. Lors de la conception, les CHs forment un système multi-sauts, et le système coopératif MIMO est introduit dans chaque saut lors d'une transmission. Le protocole est divisé en tours. Chaque tour se compose de

trois phases :

- La phase de formation des clusters, au cours de laquelle les clusters sont organisés et NC sont sélectionnés.
- Phase du routage, au cours de laquelle la table de routage est construite.
- La phase de la transmission, pendant laquelle les données sont transférées à partir des nœuds au CH et transmises à la station de base.

1) phase de formation de cluster : dans cette phase, chaque nœud va choisir d'être un CH avec une probabilité sur la base de son énergie restante. Après l'élection des CHs, chaque CH diffusera un message publicitaire (ADV) avec une puissance P_{out} en utilisant un protocole d'accès au canal (CSMA) le message contient l'identifiant de la tête. Si un CH reçoit l'ADV d'un autre t cluster-Heads avec une force du signal (RSS) qui dépasse un seuil th , il faudra prendre CH_t comme un voisin de CH et l'enregistrement de l'ID de t.

2) Phase de routage : pour construire la table de routage, l'idée est d'utiliser le vecteur de distance. Chaque CH maintiendra une table de routage, dans laquelle chaque entrée contient l'ID du cluster de destination, ID du cluster à un saut, les ID de NC, et la consommation moyenne d'énergie par bit. Initialement, seuls les enregistrements pour les CHs voisins existent dans la table de routage. Ensuite, chaque CH informe simplement ses voisins CHs de sa table de routage.

3) Phase de transmission de données : dans cette phase, les membres du cluster vont transmettre leurs données au CH en plusieurs trames. Dans chaque trame (donnée), chaque membre du cluster transmet ses données au cours de sa tranche de transmission spécifiée par le protocole TDMA dans la phase de formation du cluster, puis se mettre en veille dans d'autres créneaux pour économiser l'énergie.

3.3.3 Virtual MIMO Channels in Cooperative Multi-hop Wireless Sensor Networks

Dans [38], les auteurs proposent une transmission, et une réception coopérative entre les nœuds d'un même cluster dans un réseau de capteurs, dans le but d'exploiter les gains divers des systèmes MIMO. Ils ont défini les différents CSI des nœuds capteurs. Ils considèrent que chaque nœud appar-

tenant à un cluster possède un CSI à jour et parfait, tandis que le CSI entre deux nœuds de deux clusters indépendants n'est pas connu.

3.3.3.1 Définition du modèle transmission/réception cluster à cluster

Les auteurs supposent qu'un cluster transmetteur (T.C) est composé de N_t nœuds coopératifs, et qu'un cluster récepteur (R.C) est composé de N_r nœuds coopératifs.

1) Coté transmetteur :

Le T.C assure deux fonctions :

1. Premièrement, la diffusion de données dans le même cluster. Ainsi, tous les nœuds actifs peuvent décoder l'information (l'ensemble des nœuds actifs : sous ensemble de nœuds du cluster N_t)
2. Deuxièmement, la transmission de données entre deux clusters différents via un canal MIMO ($n_t \rightarrow N_r$)

2) Coté récepteur :

Durant un intervalle de temps donné, le cluster récepteur ainsi que tous les nœuds qui le composent reçoivent la donnée ($n_t \rightarrow N_r$).

les auteurs de [38] disposent de deux time-slots consécutifs ITA et ITE pour une transmission de données d'un cluster à un autre cluster :

- *Intra-cluster (ITA)* : durant ce slot les données sont diffusées dans le cluster avec une puissance p_1 durant un temps α .

- *Inter-cluster (ITE)* : durant ce slot le sous-ensemble de nœuds actifs n_t coopèrent pour transmettre les données avec une puissance p_2 pendant un temps $(1 - \alpha)$ au R.C.

Ainsi, l'énergie consommée lors de la transmission/réception de données, d'un cluster à un autre cluster (par sauts multiples) est :

$$E_t = \alpha * p_1 + (1 - \alpha) * p_2$$

3.3.3.2 La probabilité d'interruption

Le problème rencontré, lors de la transmission-réception entre clusters est l'interruption du signal. La probabilité totale d'interruption lors des $N-1$ sauts entre clusters est donnée comme suit :

$$P_{out} = 1 - \prod_{m=1}^{N-1} (1 - P_{out}^m)$$

Où

P_{out}^m : est la probabilité minimale d'interruption entre le cluster m et $m + 1$.

L'optimisation de la probabilité d'interruption P_{out}^m n'est pas une tâche facile, mais, l'échange optimal entre les nœuds coopératifs (n_t), et l'optimalité de l'énergie coopérative conduisent à une minimisation de la probabilité d'interruption du signal.

3.3.3.3 Évaluation de performances

Une simulation a été élaborée pour montrer la différence entre un système MIMO coopératif et un système non-coopératif, en termes de minimisation de la probabilité d'interruption du signal.

- Les clusters sont définis comme des cercles de rayon R_{ITA} ;
- La distance entre les centres de deux clusters consécutifs est $d_{ITE}=1\text{m}$;
- La répartition des nœuds dans un cluster suit une distribution uniforme.

Pour différentes valeurs de $\frac{R_{ITA}}{d_{ITE}}$ et pour $N_1 = N_2 = 3$ (Nombre de nœuds coopératifs dans les clusters transmetteurs et récepteurs respectivement est 3).

La simulation a montré que :

- Les performances du système virtuel MIMO décroissent lorsque le rayon du cluster R_{ITA} augmente
- La probabilité d'interruption reste constante tout au long de la communication, malgré l'augmentation du nombre de sauts, par rapport au système non coopératif.
- L'analyse a montré l'avantage de l'approche MIMO par rapport au système non-coopératif.

De plus, l'augmentation du nombre de sauts engendre la décroissance de la probabilité d'interruption

et une augmentation de l'énergie sauvegardée.

3.3.4 Energy Efficiency of MIMO Transmission Strategies in Wireless Sensor Networks

Un modèle d'énergie pour les réseaux de capteurs a été proposé dans [39], basé sur la technique MIMO coopérative, et pour cela les auteurs de [39] supposent que les nœuds capteurs à proximité vont coopérer dans la transmission pour former un système MIMO en introduisant un puissant agent mobile (SENMA) équipé d'un réseau d'antennes pour recueillir des données. Un canal virtuel MIMO peut être formé, et cela afin de réduire la consommation d'énergie pour le même débit et le taux d'erreur binaire (BER). Les auteurs de [39] supposent qu'à un certain moment N_t nœuds voisins coopèrent dans la transmission des données à un agent mobile (nommé SENMA) qui est équipé de N_r antennes.

L'équivalent du système MIMO à temps discret peut être décrit comme suit :

$$Y = HX + N$$

Où :

- ◇ Y est le signal reçu par l'agent mobile ;
- ◇ X contient les sous-flux transmis par les nœuds de coopération ;
- ◇ H est une $N_R \times N_T$ matrice de canal qui capte les caractéristiques du canal entre la transmission et la réception dans les réseaux d'antennes.
- ◇ N est le bruit de fond.
- ◇ X : est la puissance de transmission.

3.3.4.1 Les avantages

- L'espace de multiplexage offre des économies d'énergie substantielles pour des communications haut débit, ce qui réduit considérablement la distance critique.
- Enfin, il est constaté que la technique d'adaptation de lien, le cas échéant, est particulièrement

significative pour les applications de réseaux de capteurs, car il contribue à réduire à la fois l'énergie d'émission et de la consommation d'énergie de circuit.

3.3.5 Energy efficiency of MIMO-based Sensor Networks with a Cooperative Node Selection Algorithm

Les auteurs de [40] proposent un protocole basé sur le protocole de routage hiérarchique (LEACH) et son extension par une incorporation d'une communication MIMO coopérative. Un très intéressant algorithme pour la sélection des nœuds coopératifs (NC) est utilisé, basé sur les caractéristiques des liens des canaux vers tous les NC possibles et de l'énergie résiduelle de ces nœuds.

3.3.5.1 L'analyse de dissipation de puissance

Chaque nœud capteur dissipe de l'énergie qui ne dépend pas seulement de la transmission, mais aussi des appareils électroniques utilisés dans un nœud. L'énergie totale peut être exprimée par l'expression suivante :

$$E_b = E_{ana} + E_{dig}$$

Où :

E_{ana} : est l'énergie consommée par le convertisseur analogique.

E_{dig} : est l'énergie consommée par les parties numériques du nœud.

Les auteurs de [40] se concentrent sur la distinction de l'énergie consommée par le circuit du nœud qui est notée E_{circ} , et de l'énergie qui dépend de la puissance de transmission qui est notée E_{trans} .

La consommation d'énergie peut également être donnée par les expressions suivantes :

$$E_b = E_{trans} + E_{circ},$$

$$E_{trans} = (\alpha + 1)P_t T_{on} / L,$$

$$E_{circ} = ((P_{c-ana} + P_{detector} + P_{c-dig})T_{on} + 2P_{syn}T_{tr}) / L.$$

Où

\checkmark P_{c-ana} , $P_{detector}$, P_{c-dig} et P_{syn} sont les dissipations sur le circuit analogique, le détecteur, les parties numériques d'un circuit et le synthétiseur de fréquence, respectivement.

✓ T : est le temps nécessaire pour la transmission de L bits.

✓ T_{tr} : est le temps nécessaire pour qu'un nœud passe du mode "veille" en mode "actif".

3.3.5.2 La solution proposée

Les auteurs de [40] proposent un algorithme simple de sélection du nœud coopératif, sur la base d'une estimation des conditions du canal dans les liens entre les nœuds voisins. Cet algorithme s'applique aux Structures MIMO décrites dans (3.2).

Une nouvelle métrique TEL (totale d'énergie - Durée de vie) est introduite.

Les auteurs de [40] supposent que le canal est à la fois en transmission locale et longue-distances et que chaque nœud doit choisir entre les N nœuds voisins pour la coopération. Autrement dit, la puissance reçue par chaque nœud j ($J = 1, 2... N$) après qu'un nœud source émet un paquet de données peut être estimée l'équation suivante :

$$P_r^j = P_t - PL(d_j) + G_t + G_r$$

Avec

$$PL(d_j) = \overline{PL(d_j)} + \chi$$

Où

G_t, G_r sont les gains d'antennes de l'émission et de la réception, respectivement.

TEL est une fonction de PL (d_j) : $TEL_j = f(PL(d_j))$, elle comprend également des informations sur l'énergie de chaque nœud j notée E_{left}^j avec :

$$E_{left}^i : TEL_j = f(E_{left}^i)$$

La sélection de Nœud de coopération (NC) est faite comme suit :

$$TEL_j = \frac{PL(d_j)}{E_{left}^i}$$

$$NC = argmin\{TEL_j\}$$

Le nœud qui possède la fonction TEL minimale sera choisi comme un nœud coopératif.

3.3.5.3 Avantage de la solution proposée

- La mise en œuvre de l'algorithme de sélection des nœuds coopératifs offre des gains remarquables en termes d'efficacité énergétique.

3.3.6 Joint rate and cooperative MIMO scheme optimization for uniform energy distribution in Wireless Sensor Networks

Au lieu d'utiliser une transmission SISO entre le nœud source S et le nœud de destination D sachant qu'une transmission SISO n'est pas pratique pour de longues distances, les auteurs de [41], créent une transmission C-MIMO avec l'utilisation de la structure STBC orthogonale STBC (O-STBC) (Voir 3.2.3) de Tarokh, dans le but de réduire la consommation d'énergie d'émission.

3.3.6.1 Coté Émission

Le nœud source S peut coopérer avec ses voisins et échanger ses données (La distance entre les nœuds coopérants $d_c \ll d$). Où d_c est la distance entre le nœud coopératif et la source et d est la portée de transmission.

3.3.6.2 Côté Réception

Les nœuds voisins du nœud de destination D coopèrent pour recevoir les symboles modulés et les retransmettre au nœud de destination D .

Les auteurs de [41] considèrent la consommation d'énergie dans un cluster qui emploie les communications de coopération pour la transmission/ la réception de données.

Ils calculent la consommation totale d'énergie dans le cluster "j".

$$\text{Les donnes de cluster "j"} = \sum_{i=1}^N l_i + \text{Les donnes dtectes dans le groupe } j * FF$$

Où :

- l_i : Les données détectée dans le groupe i .
- FF : est le facteur de fusion [42].
- J : est le cluster 'j' qui dispose de N données à transmettre pour les autres clusters.

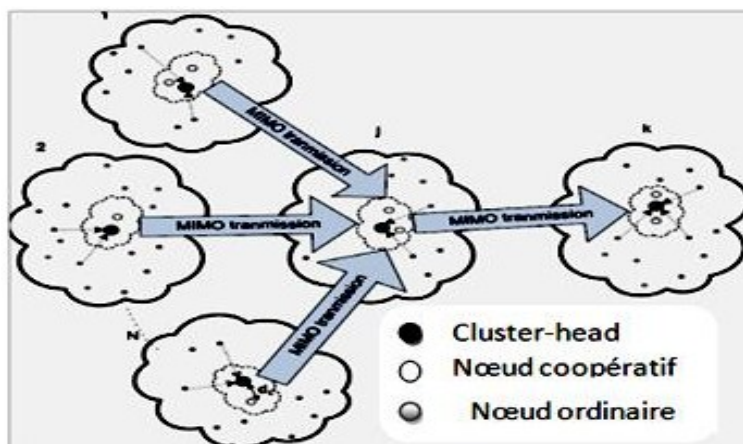


FIGURE 3.5 – Modèle de consommation d'énergie

3.3.6.3 La consommation d'énergie dans une communication MIMO coopérative

L'énergie supplémentaire de l'échange de données locales coopératives est dépendante des antennes de coopération, du nombre locale de nœuds et de la distance d_c entre deux nœuds coopérants à la fois du côté T_X (émission) et du côté R_X (réception).

Les auteurs de [41] supposent que la distance moyenne entre le cluster émetteur et le cluster de réception est d et il ya n_T nœuds coopératifs dans le côté d'émission T_X et n_R nœuds coopératifs du côté réception R_X .

Par conséquent la consommation totale d'énergie dans la transmission coopérative est :

$$E_{TRANS-coop-total} = E_{TRANS-coop} + E_{TRANS-OH-trans} + E_{TRANS-OH-rcv}$$

3.3.6.4 Évaluation de performances

La simulation a montré que la technique MIMO multi-saut donne comme résultat la réduction de la consommation d'énergie par rapport à la technique non-coopérative.

3.3.7 Energy Efficiency Evaluation of Alternative MIMO - based Sensor Networks

Les auteurs de cet article [43], résument la structure et la consommation d'énergie des deux schémas MIMO appliqués dans un WSN, l'approche MIMO simple et l'approche MIMO combinée

multi-saut.

3.3.7.1 La structure MIMO simple

1) Coté de l'émetteur

⇒ Les auteurs supposent qu'il y a M_t nœuds voisins avec des données à transmettre au nœud de destination.

⇒ Chaque nœud diffuse son information à tous les autres nœuds en utilisant des tranches de temps différentes (transmissions locales), sachant que la séquence de transmission est codée selon le code de diversité d'Alamouti. L' i -ème nœud transmet ensuite la séquence codée.

2) Coté du récepteur

⇒ Sur le côté du récepteur, les nœuds M_r (y compris le nœud de destination) reçoivent les données codées, et le nœud émetteur transmet les données vers le nœud de destination après décodage de la séquence reçue en n_r symboles.

L'énergie totale du réseau nécessaire pour achever une transmission de L bits sur la base de la structure MIMO ci-dessus est donnée par :

$$E_{MIMO} = L_{MIMO} \sum_{i=1}^{M_t} E_{b,i}^t + L_{MIMO} E_b^l M_t + \frac{L_{MIMO} \times M_t}{b} \sum_{j=1}^{M_r-1} E_{b,j}^r n_r$$

Où :

E_b^t , E_b^r et E_b^l sont les consommations d'énergie d'émission et de réception dans le côté de l'émetteur, le côté du récepteur pour la transmission respectivement.

$\frac{L_{MIMO} \times M_t}{b}$ Exprime le nombre total de symboles transmis du côté de l'émetteur, en supposant que b est la taille de constellation utilisée par le code d'Alamouti.

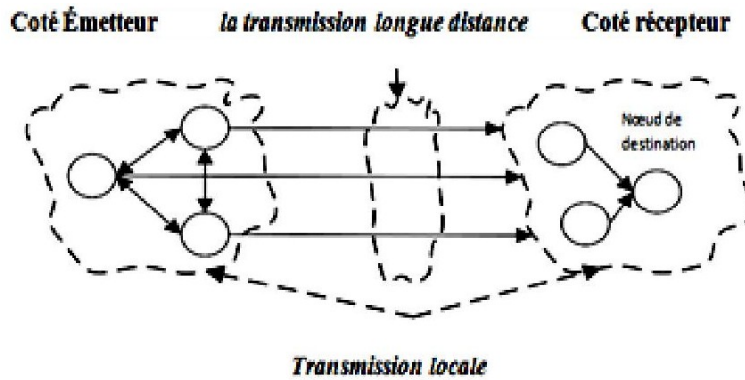


FIGURE 3.6 – Approche MIMO pour les réseaux de capteurs sans fil

3.3.7.2 La structure MIMO combinée multi-sauts

Les nœuds M sont déployés dans une zone de capture R et forment des clusters. Ces clusters, fonctionnent comme des émetteurs et des récepteurs MIMO, elles sont appelées MIMO - clusters. Les auteurs de [43] supposent qu'il y ait H sauts MIMO pour arriver à la destination. Ce qui donne $(H-1)$ clusters formés au total. L'énergie totale consommée de ce modèle est évaluée par l'équation (1), en supposant que H est donné par l'équation suivante :

$$E_{MIMO-multihop} = E_{MIMO}(D_i) \times H$$

$$H = \frac{D}{D_t}$$

Avec D_t : la distance moyenne entre chaque couple de clusters MIMO

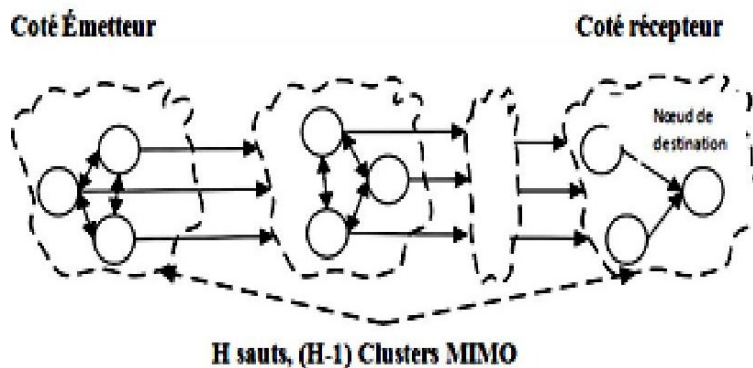


FIGURE 3.7 – La structure MIMO multi-sauts

3.3.7.3 Évaluation de performances

L'évaluation de performances des deux régimes cités précédemment est parvenue à la conclusion que l'utilisation de la structure MIMO peut réduire la consommation d'énergie du réseau de capteurs. En outre, les gains obtenus par l'utilisation du régime MIMO multi-saut dépendent du système MIMO appliqué.

3.3.8 Optimisation énergétique des transmissions MIMO Coopératives pour les réseaux de capteurs.

Dans ce travail [31], les auteurs montrent l'efficacité énergétique de transmission MIMO pour les réseaux de capteurs sans fil par rapport à la transmission SISO.

Les systèmes utilisant des antennes multiples tant à l'émission qu'à la réception (MIMO) nécessitent moins d'énergie que le système mono-antenne (SISO), pour une transmission au même taux d'erreur binaire TEB [32] dans le but d'économiser l'énergie de transmission.

Des techniques MIMO utilisant des codes spatio temporels en bloc STBC (Space Time Bloc Codes) [33] sont employées pour envoyer simultanément les données au destinataire tout comme dans un système MIMO classique (chaque nœud coopérant joue le rôle d'une antenne).

Parmi les techniques multi-antennes les STBS [33] sont sans doute les plus appropriés au contexte des réseaux de capteurs [32].

A la réception, les voisins coopérants reçoivent le signal MIMO modulé et retransmettent leurs informations respectivement jusqu'au destinataire. L'énergie supplémentaire demandée par l'échange local de données en vue de la coopération, dépend du nombre d'émetteurs N_t qui coopèrent et la distance d_m entre chaque deux paires d'éléments.

3.3.8.1 Étape de l'émission

Le nœud S doit d'abord diffuser ses N_b bits d'informations aux nœuds $N_t - 1$, autres nœuds coopérants. Après avoir reçu N_b bits du nœud S les N_t émetteurs coopérants vont coder et moduler leurs bits en symbole (STBC [33]) et envoyer l'information. L'énergie par bit consommée lors d'une transmission locale est notée : $E_{pbcoopTx}$ pour ($d_m = d$ et $N_t - 1$).

La consommation supplémentaire d'énergie à l'émission E_{coopTx} dépend de la consommation par bit $E_{pbcoopTx}$ et peut être calculée comme suit :

$$E_{coopTx} = N_b * E_{pbcoopTx}$$

3.3.8.2 Étape de réception

Les $N_r - 1$ récepteurs coopérants vont recevoir cette information MIMO modulée, quantifiée un symbole (STBC [33]) en N_{sb} bits et retransmettre ces derniers jusqu'à D (nœud de destination). La consommation supplémentaire d'énergie en réception E_{coopRx} dépend de N_r (nœuds récepteurs coopérants), de N_{sb} bits, et de la consommation d'énergie par bit $E_{pbcoopRx}$.

$$E_{coopRx} = N_{sb} * (N_r - 1) * N_b * E_{pbcoopRx}$$

3.3.8.3 Évaluation de performances

Les résultats montrent qu'il y a une transmission de (10^7) bit avec un taux d'erreur TEB de (10^{-5}) d'une source S vers une destination D séparé d'une distance d , sachant que la distance locale entre nœuds coopérants est de $d_m = 5m$.

Sur la base de toutes ces données, une simulation a montré que :

- Les techniques multi-antennes coopératives peuvent procurer un gain en énergie très intéressant dans le domaine des réseaux de capteurs.
- Les transmissions MIMO et MISO (Multiple Input Single Output) sont plus efficaces pour de longues distances que les transmissions SISO.
- En choisissant le meilleur ensemble (Nt-Nr) (nombre d'émetteurs, Nombre de récepteurs), il sera possible d'optimiser la consommation énergétique en fonction de la distance.
- L'introduction de l'approche MIMO coopérative multi-saut (2-2) s'avère très intéressante pour des réseaux dont la densité n'est pas homogène.

3.3.8.4 Discussion

L'approche MIMO coopérative nécessitant une synchronisation très précise en émission et étant plus sensible aux erreurs d'estimation du canal, des études sont en cours pour déterminer la dégra-

dation des performances dues à ces imprécisions.

3.4 Conclusion

Les techniques coopératives peuvent procurer un gain intéressant en énergie dans le domaine des réseaux de capteurs. Les transmissions coopératives MIMO et MISO étant plus Efficaces pour les longues distances que les transmissions SISO ou SISO multi-étapes.

Dans le chapitre suivant, nous allons introduire une nouvelle technique MIMO coopérative qui a comme avantage de maximiser la durée de vie du réseau.

Chapitre 4

Algorithme d'équilibrage de charge et économie d'énergie pour les RCSFs

4.1 Introduction

Les capteurs sont conçus pour fonctionner durant des mois voire des années. Ainsi, la capacité énergétique des capteurs doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du réseau. A noter qu'une fois qu'un nœud capteur a épuisé son énergie, il est considéré comme défaillant. Ainsi, le développement d'une technique efficace permettant d'économiser la ressource énergétique est un objectif primordial pour les réseaux de capteurs sans fil.

Des topologies de type clusters (hiérarchiques) ont été proposées afin de réduire la consommation d'énergie. Le clustering consiste à partitionner le réseau en sous ensembles appelés clusters afin de faciliter sa gestion en particulier le routage. Un cluster est défini par un ensemble de nœuds possédant un nœud spécial nommé cluster-head (CH). Le CH est élu suivant différents critères et informations sur le réseau : le niveau de l'énergie d'un capteur, la connexion avec les autres capteurs, etc. Le rôle du CH est d'organiser la communication dans les clusters ainsi que dans le réseau, collecter les données à partir de tous les nœuds capteurs appartenant à son cluster, agréger les données rassemblées par des procédures de fusion et faire le relais entre les nœuds du cluster et la station de base directement ou via d'autres CHs ou d'autres nœuds du réseau.

Le but principal du routage hiérarchique est de maintenir l'efficacité de consommation d'énergie des nœuds capteurs en les impliquant dans la communication multi-sauts avec un cluster-head. A cet

égard, nous nous sommes intéressés à un algorithme de clustering avec équilibrage de charge et nous avons introduit une technique de coopération MIMO pour l'économie d'énergie ainsi qu'une technique de routage.

Ce chapitre sera dédié à la présentation et la motivation de l'idée principale de notre proposition visant à étendre l'algorithme VCA (An Energy-Efficient Voting-Based Clustering Algorithm for Sensor Networks) pour le routage en se basant sur le principe de l'algorithme VMBCL [34] (Virtual MIMO-Based Cross-Layer Design for Wireless Sensor Networks) pour la coopération et le routage de données.

4.2 Motivations

Afin d'obtenir de meilleures performances dans un réseau de capteur en terme d'énergie consommée, il est primordial d'équilibrer la charge de travail à travers tous ces nœuds capteurs. L'équilibrage de charge couvre l'ensemble des techniques permettant une distribution équitable de la charge de travail parmi tous les nœuds. L'objectif consiste essentiellement à optimiser la consommation de l'énergie.

L'algorithme VCA est efficace pour économiser les ressources des capteurs en énergie. Néanmoins, en premier lieu, comme VCA ce n'est qu'un protocole de clusterisation, et non pas de routage, c'est pour cette raison, que nous avons pensé à l'étendre par l'utilisation d'une stratégie de coopération. En deuxième lieu comme VCA ne prend pas en considération le routage des données du cluster-head vers la station de base qui est un problème primordial dans les réseaux de capteurs, c'est pour cette raison, que nous avons pensé à étendre l'algorithme VCA au routage de données capturées et agrégées. Ainsi que le protocole VCA ne possède pas une phase de coopération.

Pour se faire, nous nous sommes inspirés du principe du protocole VMBCL afin de remédier à ses deux principaux manques qui sont la sélection des nœuds coopératifs dans le but d'équilibrer la charge du réseau et l'établissement d'un chemin vers la station de base afin d'allonger la durée de vie du réseau. C'est sur ces principes que nous nous sommes basés pour élaborer une proposition permettant de réduire des inconvénients comme la perte d'énergie dans les réseaux de capteurs.

4.3 Principe de la proposition

Notre approche consiste à une hybridation d'un algorithme de clusterisation avec équilibrage de charge VCA et une stratégie de coopération ainsi qu'une stratégie permettant d'acheminer les informations vers la station de base.

Notre approche consiste à la sélection des cluster-heads la formation des clusters en se basant sur VCA, une coopération est effectuée en se basant sur un protocole de coopération, ainsi qu'une technique d'acheminement proposée par les auteurs dans l'article [34] qui répond aux problèmes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Par conséquent, notre choix était orienté vers une stratégie de coopération en s'inspirant du principe du protocole VMBCL en proposant une technique de routage. L'hybridation de l'algorithme VCA avec une considération de la distance d'un nœud par rapport à la station de base, VMBCL et la technique de routage proposée, est dans le but d'assurer une durée de vie maximale du réseau en équilibrant l'énergie de la manière la plus équitable possible. Les différentes phases du protocole proposé VM-VCA (Virtual MIMO - Energy-Efficient Voting-based Clustering Algorithm) sont les suivantes :

4.3.1 Phase d'initialisation

La phase d'initialisation consiste à assigner à chaque capteur un poids d'éligibilité à devenir un cluster-head en fonction de son énergie résiduelle e_i et la distance d qui le sépare de la station de base.

Chaque capteur " i " diffuse à son voisinage un vecteur de données (e_i, d_i) qui contient l'énergie résiduelle et la distance qui le sépare de la station de base : tous les capteurs à sa portée reçoivent ce vecteur.

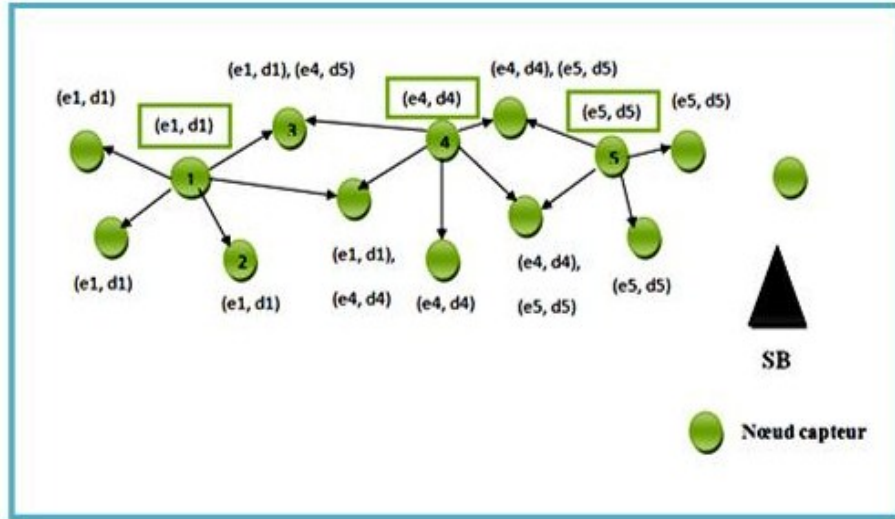


FIGURE 4.1 – Emission d'un vecteur (e, d) par chaque capteur à tous ses voisins

Le capteur " i " va collecter à son tour les vecteurs de données de l'ensemble de ses voisins (v_i étant l'ensemble des capteurs dans la portée radio de " i ", y compris " i ") et calcule pour chaque voisin j une note $N_{i,j}$ suivante :

$$N_{i,j} = \frac{e_j}{\sum_{k \in v_i} e_k} + \frac{d_j}{\sum_{k \in v_i} d_k}$$

Une fois que les notes sont calculées, chaque capteur envoie ces notes à ses voisins. Ces derniers reçoivent ces notes ainsi que d'autres qui sont attribuées par d'autres capteurs.

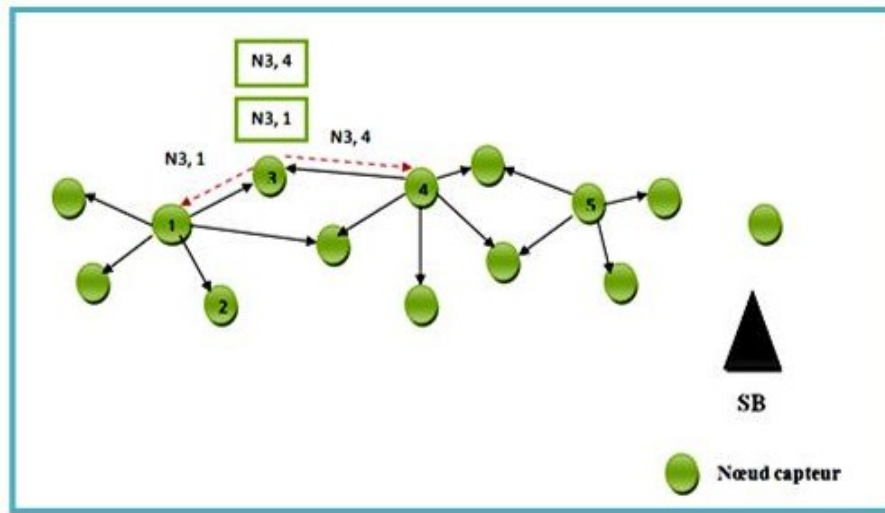


FIGURE 4.2 – L'envoi des notes déterminées

Après avoir reçu toutes les notes distribuées à chaque capteur, tous les capteurs déterminent leur poids P_i en fonction des notes attribuées par ses voisins v_i :

$$P_i = \sum_{k \in v_i} N_k^i$$

Les scores d'éligibilité sont par la suite diffusés par chaque nœud à ses voisins.

4.3.2 Phase d'auto-désignation des clusters-heads

La procédure de clustering est réalisée en plusieurs itérations : à chaque itération, chaque capteur compare son score d'éligibilité (score énergétique) avec les scores de ses voisins non encore rattachés à un cluster-head.

Chaque capteur compare son score d'éligibilité avec celui de ses voisins non encore élus cluster-heads et non rattachés à un cluster-head : si son poids est plus élevé que celui de ses voisins, il s'auto-désigne cluster-head. Ainsi au sein d'un cluster, le capteur assurant le rôle de cluster-head est nécessairement celui disposant de la plus haute énergie résiduelle ainsi qu'une distance minimale qui le sépare de la station de base.

Au terme de cette phase certains capteurs seront désignés comme cluster-head, la figure suivante illustre cette désignation.

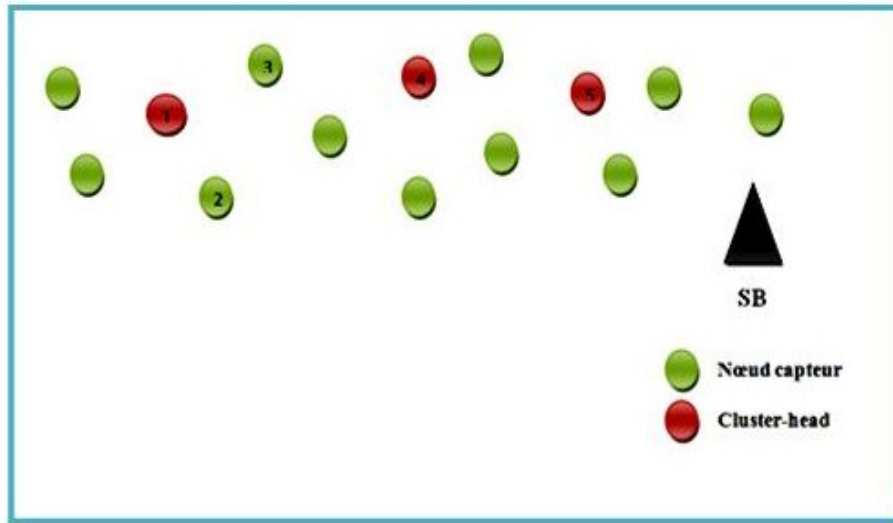


FIGURE 4.3 – L'auto-désignation des cluster-heads

4.3.3 Phase de rattachement aux cluster-heads

Une fois que les CHs sont élus, un capteur peut se situer dans la portée de plusieurs cluster-heads : il doit alors choisir de rejoindre l'un des clusters. Chaque cluster-head i calcule un facteur de charge CH_i qu'il diffuse à tous ses voisins tel que :

$$CH_i = \frac{P_i}{deg_i}$$

Où :

P_i représente le poids du cluster-head et deg_i représente le nombre de capteurs que contient le cluster dont le capteur i est cluster-head.

Nous avons amélioré le travail fait par ces auteurs [22] qui cherchent par cette décision à réaliser un équilibrage de charge (maximiser la durée de vie du réseau). Pour cela, le capteur non-attaché privilégiera son rattachement au cluster dont le cluster-head dispose de l'énergie la plus élevée, ainsi ayant un minimum de nombre de capteurs à gérer et dont la distance qui le sépare d'un cluster-head est minimale.

Les capteurs non rattachés réceptionnent les annonces des cluster-heads nouvellement désignés et réalisent leur choix en comparant toutes les valeurs de charge reçues. Une fois que leur choix est réalisé, ils diffusent un message de retraitement de la procédure de clusterisation.

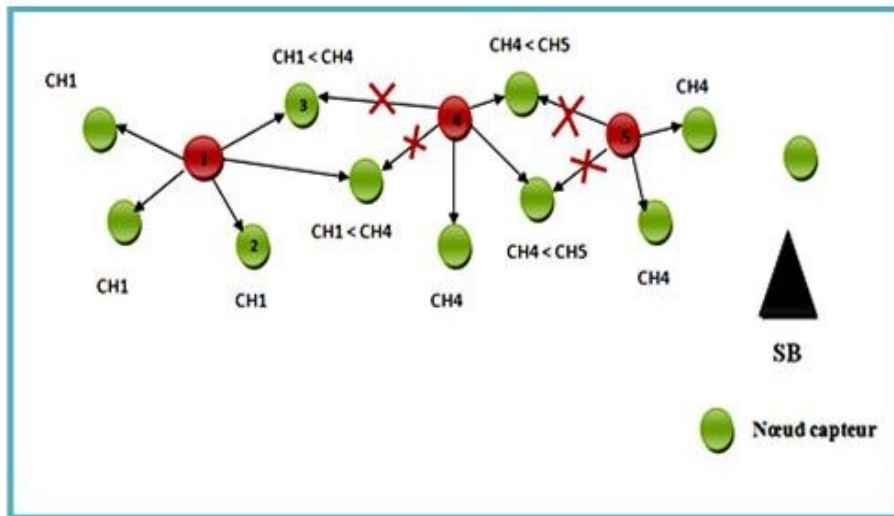


FIGURE 4.4 – Envoi des facteurs de charge aux voisins par les cluster-heads

Au terme de cette phase, certains capteurs se seront désignés cluster-heads et d'autres auront choisi de se rattacher à un cluster-head.

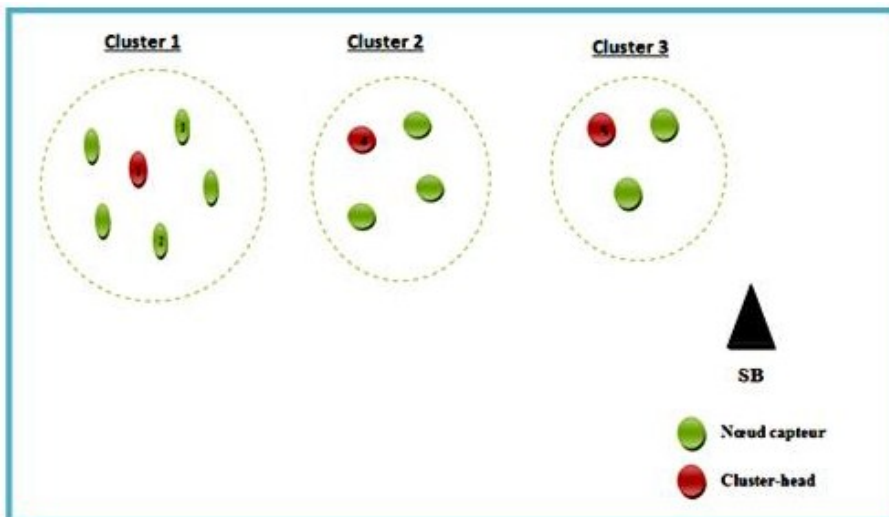


FIGURE 4.5 – Formation des clusters

4.3.4 Phase de sélection des nœuds coopératifs (NC)

Appliquer une technique MIMO de coopération entre les nœuds d'un réseau de capteurs, permet de réduire la consommation d'énergie et ainsi d'augmenter la durée de vie du réseau. Pour cela nous avons opté pour cette technique afin d'éviter le plus possible la communication directe entre deux cluster-head en utilisant ces nœuds coopératifs (NC) comme nœuds intermédiaires et cela permet d'équilibrer la consommation d'énergie, ainsi dans le cas où la communication directe entre cluster-head n'est pas possible.

Une fois que les clusters sont formés, chaque CH diffuse un message de demande de coopération (COOPERER-REQ) à ses voisins, ce message contient l'ID du cluster-head émetteur.

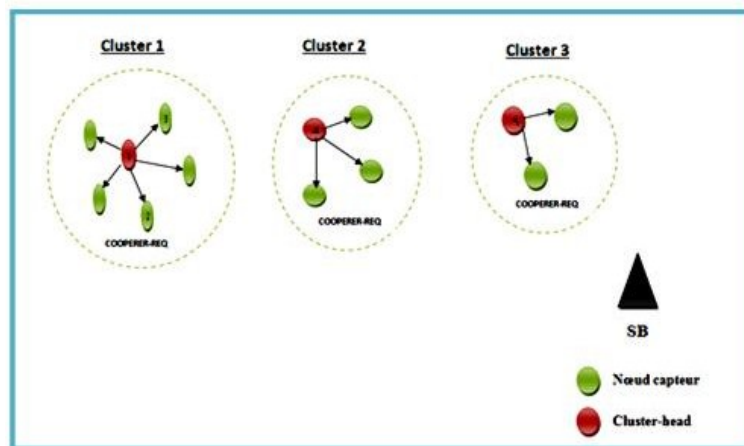


FIGURE 4.6 – Demande de coopération

Les nœuds coopératifs sont tous les nœuds ordinaires (non cluster-head) ayant dans leur voisinage au moins deux cluster-head y compris le CH du cluster auquel ils appartiennent. Sachant que les nœuds qui vont être des nœuds coopératifs (se sont les nœuds qui se trouvent à la portée d'au moins de deux CH) renvoient un message d'acquiescement pour la coopération (ACK-COOPÉRER) au CH. Les autres nœuds (non coopératifs) ignorent le message de coopération.

À la fin de cette phase, chaque CH a sélectionné les nœuds coopératifs (NC) correspondants pour la communication coopérative MIMO avec leurs CH voisins (Les CHs des autres clusters).

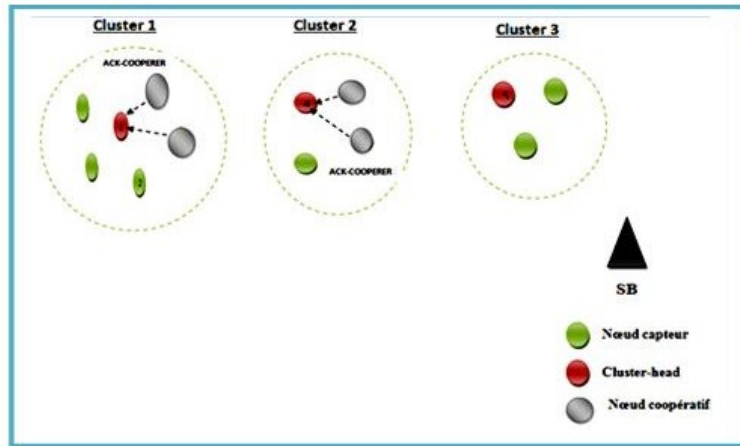


FIGURE 4.7 – La sélection des nœuds coopératifs

4.3.5 Phase de routage et transmission de données

Les données capturées et agrégées doivent être acheminées vers la station de base pour cela, il est primordiale d'avoir conçu une stratégie de routage. Le but est de minimiser la consommation d'énergie. Ainsi, les micro-capteurs, avec leur mémoire de taille réduite, ne peuvent pas garder tous les chemins possibles dans leurs tables de routage.

Pour cela, nous avons défini une fonction en s'inspirant de [34]. Chaque CH calcule la fonction $G(d_j)$ de chaque nœud coopératif (NC) appartenant à son cluster, la fonction est calculée comme suit :

$$(B_j t) = \frac{E_j}{G(d_j)} \dots (1)$$

avec :

$$G(d_j) = \frac{M_l N_f d_j (4\pi^2)}{G_t G_r \lambda^2}$$

Tels que :

M_l : représente la bande passante ;

N_f : représente le niveau du bruit au coté récepteur ;

G_t représente le gain d'antenne à l'émission ; G_r : représente le gain d'antenne à la réception ;

λ : est la longueur d'onde porteuse ;

E_j représente l'énergie résiduelle du cluster-head ;

d_j représente la distance entre un capteur j et un cluster-head ;

$G(d_j)$: est une fonction qui a comme paramètre la distance d .

Le raisonnement derrière un tel critère **(1)** est que les nœuds j (parmi les nœuds coopératifs) avec $B_j t$ maximale seront choisis pour communiquer avec le CH voisin puisqu'ils ont une plus grande énergie résiduelle (E_j).

Pour la transmission de données, les membres du cluster vont transmettre leurs trames de données au CH. Après qu'un CH ait reçu des trames de données des membres du cluster, il effectuera l'agrégation des données pour éliminer la redondance des données [34].

Après l'agrégation des trames de données reçues, le CH va avancer les paquets de données sur la route au prochain nœud sélectionné selon l'équation (1). Dans chaque communication à un saut, s'il existe un nœud coopératif " j ", les CH vont ajouter un en-tête au paquet de données, qui comprend l'information d'identité du cluster source, ID du cluster du saut-suivant, et ID de la station de base. Les CH vont ajouter un en-tête au paquet de données, qui comprend l'information d'identité du cluster source, ID des cluster-heads voisins.

Afin d'améliorer la fiabilité en transmission de données, le CH met en mémoire tampon et code le paquet de données selon une séquence linéaire de codage (voir 3.2.4). Puis, il procède à la diffusion de paquets de données codées. Une fois que les nœuds coopératifs correspondants ont reçu le paquet de données, ils codent le paquet de données par STBC orthogonale [25], et transmettent au CH dans le prochain saut.

Après avoir reçu le paquet, le CH dans le cluster suivant va décoder et corriger les erreurs sur les bits par le codage en blocs linéaires [45]. L'envoi d'un acquittement négatif se fait soit si une erreur apparaît après décodage, ou bien dans le cas d'un " Time Out " c'est-à-dire la non réception d'un acquittement positif de la destination et son temps d'attente dépasse le temps d'attente prévu.

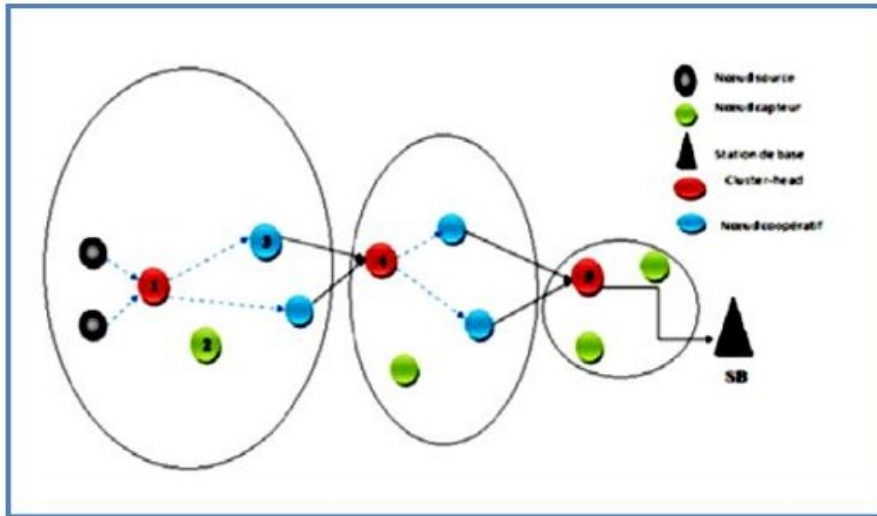


FIGURE 4.8 – Transmission de données via un système coopératif

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit le principe de l'approche proposée en détails. L'évaluation de performances de l'algorithme VM-VCA et une comparaison avec VMBCL qui est un protocole de clusterisation hiérarchique intégrant la technique coopérative MIMO et une technique de routage feront l'objectif du chapitre suivant.

Chapitre 5

Simulation et Evaluation de performances

5.1 Introduction

L'utilisation d'un réseau réel pour l'évaluation est difficile et couteuse. Aussi, le réseau réel n'offre pas la souplesse de varier ses différents paramètres et pose en plus le problème d'extraction de résultats, c'est pour cela que la majorité des travaux d'évaluation des performances utilisent le principe de la simulation vu les avantages qu'elle offre.

La simulation consiste à gérer le temps ainsi que les actions qui sont liées aux différents instants d'un système réel et à faire fonctionner abstraitement le modèle qui représente ce système.

Pour expérimenter la solution proposée, nous avons repris un simulateur écrit en java et qui a été utilisé pour la validation du protocole de clusturisation [4] sur lequel nous avons apporté des modifications et implémenté le protocole VM-VCA. Cette décision a été prise après l'étude des simulateurs existants (NS-2 [46], OMNet++ [47], Glomosim [48], ...), qui étaient pour la plupart beaucoup trop lourds et peu adaptés à nos besoins.

Dans ce chapitre, nous fournissons les résultats de simulation obtenus par VM-VCA. Pour évaluer ses performances, nous avons choisi de les comparer par simulation avec celles d'un algorithme de clustering VCA, proposée par Min Qin et Roger Zimmermann [22].

5.2 Etapes du simulateur

Les différentes étapes du simulateur utilisé sont les suivantes :

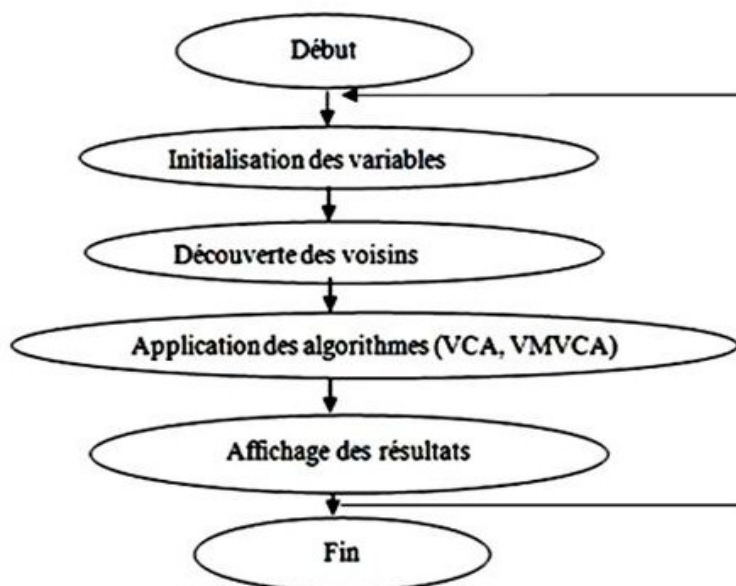


FIGURE 5.1 – Fonctionnement du simulateur

- **Initialisation des variables** : : cette étape correspond à la déclaration des variables globales (nombre de capteurs, nombre de simulations à réaliser lors de l'exécution, surface du terrain simulé...), leur initialisation, la création des capteurs (portée de transmission, capacité énergétique...) et leur déploiement aléatoire sur le terrain simulé.
- **Découverte des voisins** : : la découverte des voisins se lance automatiquement lors de l'exécution et elle se fait par diffusion. Chaque capteur se trouvant à une distance inférieure ou égale à la portée de transmission d'un autre capteur est sensé recevoir les données diffusées par ce dernier et est, de ce fait, considéré comme son voisin.
- **Application de l'algorithme de clustering VCA** : à partir d'une connaissance du voisinage direct de chaque capteur et des différents messages circulant dans le réseau (vecteurs de données, notes...) une décomposition du réseau en clusters sera réalisée par exécution des différentes

étapes de l'algorithme de clustering VCA [22].

- **Application de l'algorithme de clusterisation et coopération VM-VCA** : après la décomposition du réseau en clusters, le choix des nœuds coopératifs, un routage de données sera réalisé par exécution des différentes étapes qui suivent l'étape de clustering de l'algorithme VM-VCA implémenté.
- **Affichage des résultats** : les résultats obtenus serviront à faire une comparaison entre les protocoles implémentés (VCA et VM-VCA) selon les critères d'évaluation de performances choisis.

5.2.1 Métriques de performances

Lors de l'expérimentation de notre protocole, nous nous sommes intéressés aux métriques de performances suivantes :

- **Nombre de clusters** : mesure le nombre moyen de clusters formés durant la phase de clustering.
- **Nombre de nœuds par cluster** : mesure le nombre de nœuds dans un cluster.
- **Nombre moyen de nœuds coopératifs par cluster** : mesure le nombre moyen de nœuds qui vont être choisis pour assurer la fonction de coopération.
- **Energie consommée** : mesure en moyenne la quantité d'énergie consommée par un nœud après les différentes phases de chaque protocole.
- **La probabilité de réception des données** : mesure la probabilité qu'un cluster-destinataire reçoive les données d'un autre cluster-Head se trouvant ou pas dans sa portée de transmission. Cette probabilité est calculée comme suit :

$$X = (d_i, Nbr_t) / Nbr.$$

Où :

X : c'est la probabilité de réception.

d_i : c'est la distance entre deux cluster-Heads.

Nbr : nombre total de nœuds intermédiaires.

(d_i, Nbr_i) :c'est le nombre moyen de nœuds intermédiaires qui peuvent être utilisés pour la transmission de données entre deux cluster-Heads se trouvant à une distance (d_i) l'un de l'autre.

5.2.2 Modèle de simulation

Le système considéré est basé sur l'approche événementielle. La simulation par événements discrets [29] désigne la modélisation dans laquelle les grandeurs caractérisant le système (variables) ne changent qu'en un nombre fini ou dénombrable de points isolés dans le temps. Ces points sont les instants où se passent les événements. Dans ce qui suit, nous détaillerons le modèle de simulation du système considéré.

5.2.3 Description du système

Notre système représente une zone de déploiement d'une surface de $(1000 \times 1000)m^2$ comportant 500 capteurs et une station de base. De ce fait, les entités de notre système sont :

-La station de base : elle est responsable de la collecte des données.

-Les nœuds capteurs : ils servent à détecter les événements, la coopération et le routage de données dans le réseau.

Il existe trois types de capteurs :

- Les capteurs ordinaires : ils servent à détecter les événements et participent à l'émission et la réception de données dans le réseau.
- Les cluster Head (CHs) : ils servent à agréger les données capturées par les capteurs de leur cluster, ils participent au choix des nœuds coopératifs ainsi qu'au routage.
- Les nœuds coopératifs : ils servent à détecter les événements et participent à la coopération, au routage de données dans le réseau.

Le modèle réseau utilisé est un ensemble de capteurs sans fil, immobiles, aléatoirement placés sur le terrain simulé et dont l'énergie initiale de chacun d'entre eux est fixée à 5 joules.

5.2.4 Modèle d'énergie

Heinzelman et AL [36] ont proposé un modèle radio (figure 5.2).

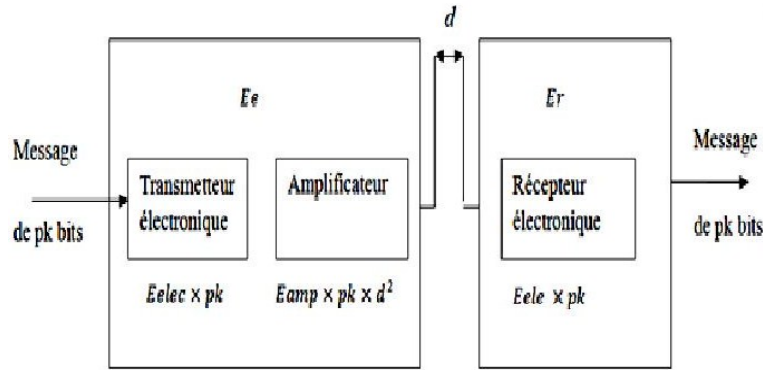


FIGURE 5.2 – Modèle d'énergie

Ainsi, selon ce modèle, l'énergie consommée pendant la transmission (E_e) d'un message de pk bits est donnée par :

$$E_e = E_{elec} \times pk + E_{amp} \times pk \times d^2$$

Alors que l'énergie consommée lors de la réception (E_r) d'un message de pk bits est donnée par :

$$E_r = E_{elec} \times pk$$

Où :

E_e : c'est l'énergie consommée en émission.

E_r : c'est l'énergie consommée en réception.

E_{elec} : c'est l'énergie électronique (énergie consommée par le transmetteur électronique) dont la valeur est fixée à 100 pJ/bit.

E_{amp} : c'est l'énergie nécessaire pour l'amplification (l'énergie consommée par l'amplificateur de l'émetteur) dont la valeur est fixée à 50 nJ/bit.

pk : est la taille en bits d'un paquet de données.

d : est la distance en mètres entre l'émetteur et le récepteur d'un paquet de données.

5.2.5 Variables descriptives du système

Les différentes variables utilisées dans notre système sont présentées dans le tableau suivant :

Définition de la variable	Nom de la variable	Type	Unité de mesure
Energie consommée lors de l'émission	E_e	double	Joule
Energie consommée lors de la réception	E_r	double	Joule
Energie résiduelle d'un capteur	énergie	double	(mètre, mètre)
Coordonnées d'un capteur sur un plan 2D	(x,y)	double	Mètre
Distance entre deux capteurs	d	float	Mètre
Distance entre un capteur et une station de base	Dist	float	Mètre
Portée de transmission d'un capteur	dist_trans	float	Mètre
Nombre de clusters	Nbre_noeud	entier	/
Nombre de voisins d'un capteur	Nbre_voisin	entier	/
Nombre de capteurs par cluster	som_clusters	entier	/
Nombre de capteurs coopératifs	Som_coop	entier	/

TABLE 5.1 – Variables descriptives du système

- **Energie résiduelle** : elle est exprimée par la différence entre l'énergie courante (E_c) et l'énergie consommée par un capteur. L'énergie d'un capteur est mise à jour par l'affectation suivante :

$$E_c = E_c - E_x \begin{cases} E_x = E_e & \text{si le capteur envoie un message;} \\ E_x = E_r & \text{si le capteur reçoit un message.} \end{cases}$$

- **Cordonnées d'un capteur sur un plan 2D** : c'est l'affectation de deux valeurs aléatoires (x et y), comprises entre 0 et la taille du terrain, à chaque capteur sur un plan à deux dimensions.
- **Distance entre deux capteurs** : : c'est la distance euclidienne entre un capteur de coordonnées (x, y) et un autre de coordonnées (x', y') :

$$d = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$$

- **Distance entre un capteur et la station de base** : c'est la distance euclidienne entre un capteur de coordonnées (x,y) et la station de base de coordonnées $(0,0)$:

$$d = \sqrt{(x)^2 + (y)^2}$$

5.2.6 Événements discrets du système

L'ensemble des événements, qui peuvent survenir dans le temps et qui provoquent un changement d'état des variables descriptives de notre système, sont représentés dans le tableau suivant :

Événement	Description
Calcul et diffusion des vecteurs de données (e_i, d_i)	Cet événement est l'événement déclencheur de l'exécution de l'algorithme de clustering et coopération VM-VCA.
Calcul et diffusion des vecteurs de données (e_i)	Cet événement est l'événement déclencheur de l'exécution de l'algorithme de clustering VCA.
Calcul des notes (N_{ij}) et leur envoi	Cet événement se produit lorsqu'un capteur reçoit les vecteurs de ses voisins directs pour les deux algorithmes (VCA, VM-VCA).
Calcul des poids énergétiques (P_i) et leur envoi	Cet événement se produit lors qu'un capteur reçoit toutes les notes (N_{ij}) de ses voisins directs pour l'algorithme VM-VCA .
Calcul de la valeur de fitness " fitness(i) " et leur envoi	Cet événement se produit lors qu'un capteur s'auto-désigne comme CH pour l'algorithme VCA.

Événement	Description
Envoi de message de demande pour la coopération (coopérer-req)	Cet événement se produit lorsque les CHs sont élus par l'algorithme VM-VCA.
Envoi de message d'acquiescement pour la coopération (ack-coopérer)	Cet événement se produit lorsqu'un CH envoie un message de demande de coopération pour l'algorithme VM-VCA.
Mise à jour du nombre de clusters	Cet événement se produit à chaque auto-désignation d'un CH pour les deux algorithmes.
Mise à jour du nombre de capteurs par cluster	Cet événement se produit à chaque rattachement d'un capteur à un CH pour les deux algorithmes.
Mise à jour du nombre de capteurs coopératifs	Cet événement se produit à chaque sélection d'un nœud coopératif par l'algorithme VM-VCA.

TABLE 5.2 – Événements discrets du système

5.2.7 Evaluation de performances

Dans ce qui suit nous allons présenter et analyser les résultats de simulations obtenus suivant les métriques que nous avons discutées précédemment.

Pour les tests réalisés (nombre de clusters, nombre de nœuds coopératifs, l'énergie consommée, la probabilité de recevoir les données par un capteur) 50 exécutions indépendantes sont réalisées : les résultats présentés moyennent les résultats de toutes les exécutions.

Pour les simulations réalisées, le paramètre variable utilisé est la portée de chaque capteur : il aurait donc été équivalent d'utiliser la surface du réseau pour variable.

5.2.7.1 Nombre moyen de clusters

Nous nous intéressons au nombre de clusters générés par l'algorithme de clustering (VCA) et l'algorithme de clustering avec coopération (VM-VCA).

Nous constatons comme le montre la figure 5.3, que le nombre des clusters formés diminue en augmentant la portée de transmission. VM-VCA permet de générer un nombre de clusters inférieur à celui obtenu par l'utilisation de VCA. Ceci est dû à la stratégie de clustering adoptée faisant en sorte que chaque CH calcule son facteur de charge en fonction de son poids énergétique ($P_i = \sum N_i$). Les notes étant calculées en fonction de l'énergie résiduelle et la distance qui sépare un capteur de la station de base.

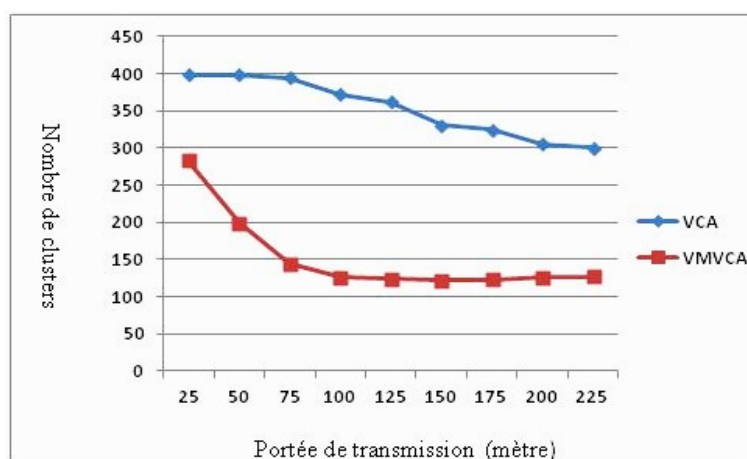


FIGURE 5.3 – Variation du nombre de clusters formés en fonction de la portée

5.2.7.2 Nombre moyen des nœuds coopératifs

Nous remarquons sur la figure 5.4 que le nombre de nœuds coopératifs formés par VCA est toujours nul, ce qui est tout à fait évident, car ce protocole n'adopte pas de stratégie de coopération. Par contre, le nombre de nœuds coopératifs augmente d'une manière significative avec l'augmentation de la portée de transmission pour le protocole VM-VCA.

Ceci est dû à la stratégie adoptée qui fait en sorte que tous les nœuds ordinaires (non cluster-

head) ayant dans leur voisinage au moins deux cluster-heads y compris le CH du cluster auquel ils appartiennent seront désignés comme nœuds coopératifs (NC), donc plus la portée augmente, plus le nombre de nœuds voisins augmente ce qui permet l'augmentation du nombre de nœuds coopératifs.

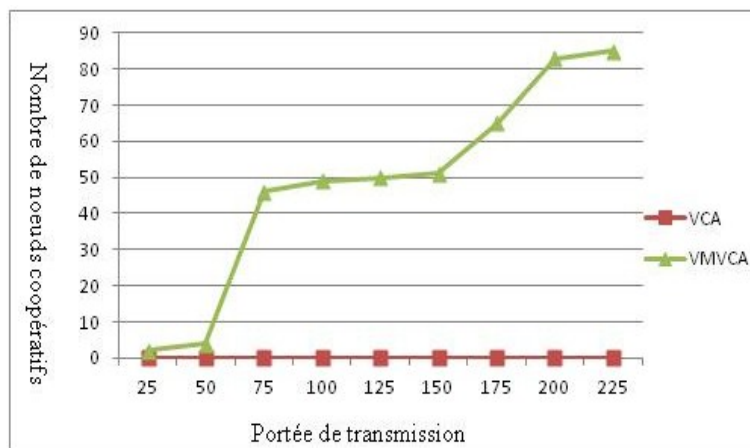


FIGURE 5.4 – Variation du nombre de nœuds coopératifs en fonction de la portée

5.2.7.3 Énergie consommée

Vu les limitations énergétiques des capteurs, il est primordial de faire en sorte de réduire l'énergie consommée afin d'augmenter la durée de vie du réseau.

La figure 5.5 montre l'énergie consommée par un capteur durant les différentes phases des deux algorithmes (VCA et VM-VCA). Comme nous le constatons sur la figure suivante, plus la portée augmente plus le nombre de voisins augmente ce qui implique une augmentation du nombre de messages échangés et ainsi une augmentation de la quantité d'énergie consommée par chaque capteur. Le gain en énergie consommée est très avantageux en faveur de VM-VCA. Ceci est dû à la technique adoptée qui permet la diminution du nombre de messages qui transitent dans le réseau. Pour une portée de 225 mètres l'énergie consommée en utilisant le protocole VM-VCA est 6 fois plus petite que celle consommée par le protocole VCA.

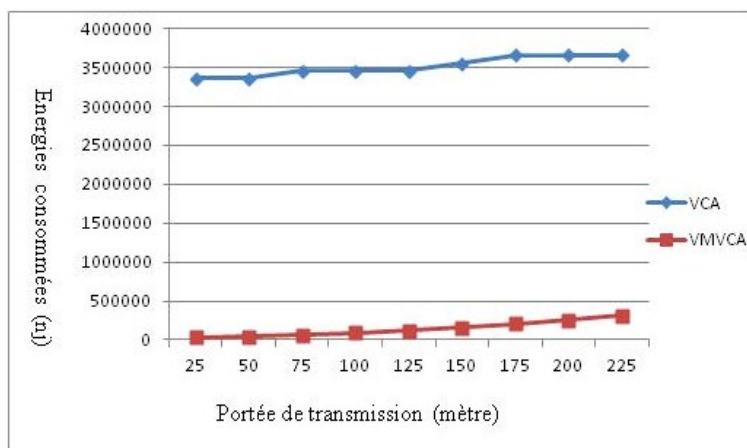


FIGURE 5.5 – Variation de la quantité d'énergie consommée en fonction de la portée

5.2.7.4 La probabilité de réception des données

L'un des objectifs fixés est de garantir que les paquets soient transmis vers la destination même dans le cas où les cluster-Heads ne se trouvent pas dans la même portée de transmission.

Comme le montre la figure 5.6 la probabilité qu'une réception soit réussie avec le protocole VMVCA est plus élevée qu'avec le protocole VCA. Nous constatons que la probabilité de réception des données augmente en augmentant la portée de transmission. Ceci est dû à l'augmentation des nœuds coopératifs qui augmente la chance de transmettre les données vers la station de base.

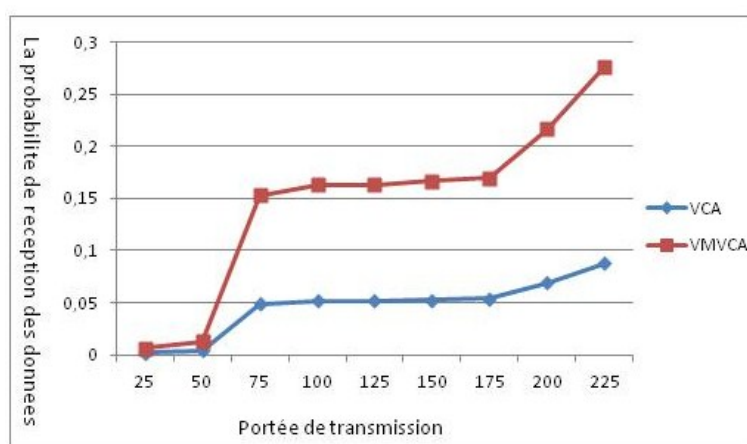


FIGURE 5.6 – Variation de la probabilité de réception des données en fonction de la portée

5.3 Conclusion

Afin de valider l'approche proposée, des simulations à évènements discrets sont réalisées et ce dans le but de montrer l'apport de l'approche proposée par rapport aux approches déjà existantes. A travers une comparaison par rapport au protocole VCA, les résultats de simulation ont montré que le protocole VM-VCA est efficace pour réduire le nombre de clusters formés et la quantité d'énergie consommée. VM-VCA permet également d'augmenter la probabilité de réception des paquets émis et ce grâce à la politique de clustering ainsi que la stratégie de coopération adoptées.

Conclusion générale et perspectives

Les réseaux de capteurs ont connu une grande évolution au cours des dernières années. Cette évolution a rencontré plusieurs contraintes dont la plus importante était la consommation d'énergie puisque les capteurs disposent de ressources limitées. Plusieurs recherches ont été faites pour la conception des protocoles qui tiennent compte de cette contrainte et qui minimisent la consommation d'énergie.

Dans ce mémoire, nous avons proposé une technique de coopération et l'adapter à une technique de clustering où les nœuds coopèrent pour la transmission des données. Cette solution se décompose en deux étapes : la première étape permet de structurer le réseau en clusters. Dans la deuxième étape, nous avons présenté notre algorithme d'équilibrage de charge avec une technique de coopération.

Dans notre solution, nous nous sommes intéressés à l'énergie comme seule ressource critique. Ce travail s'est concrétisé par la proposition d'un protocole de routage avec équilibrage de charge nommé VM-VCA qui s'est inspiré d'une hybridation des deux protocoles VMBCL et VCA. D'une part, au vue des performances obtenues par simulation, en montrant une réduction de la quantité d'énergie consommée grâce à une meilleure sélection de cluster-heads et au choix des nœuds coopératifs et grâce à la procédure de clustering avec équilibrage de charge adoptée.

En guise de perspectives, nous proposons d'autres métriques d'évaluation de performances comme le nombre de nœuds solitaires et le nombre d'itérations dans le but de finaliser la phase de clustering. D'autres perspectives consistent à tester l'approche de coopération proposée avec d'autres protocoles de coopération et à valider les résultats obtenus par l'implémentation de ces algorithmes sur d'autres simulateurs tels que : NS2, OPNET Modeler. Et enfin, tester le protocole dans un cas réel de l'application.

Bibliographie

- [1] D.AYANE et M.ZADDI. "Conservation d'énergie avec équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs". Mémoire d'ingénieur, université A.MIRA de BEJAIA, juin 2008.
- [2] E.DHIB. " Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de capteurs". Thèse de doctorat en informatique, école supérieure des communications de TUNIS, juin 2007.
- [3] K.BEYDOUN. "Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les RCSFs". Thèse de Doctorat en informatique, Université de FRANCHE COMTE, France, 2009.
- [4] N.KHOULALENE. " Regroupement avec équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs sans fil". Mémoire de magistère en informatique : Réseaux et systèmes distribués, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, 2007.
- [5] M.KHANOUCHE. "Le traitement du problème de la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil". Mémoire de magistère en informatique : Réseaux et systèmes distribués, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, 2008.
- [6] R. KACIMI. "Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil". Thèse de doctorat en Réseaux et Télécommunications, Université de Toulouse, France, 2009.

- [7] P. LEVIS, S. MADDEN, D. GAY, J. POLASTRE, R. SZEWCZYK, A. WOO, E. BREWER, and D. CULLER. "The emergence of networking abstractions and techniques in tinyos". In Proceedings of the First Symposium on Networked Systems Design and Implementation ,USENIX Association, 2004 .
- [8] A.DIALLO. "Système s multi-antennes pour diversité et MIMO". Thèse de doctorat en Sciences électronique, UNIVERSITE de Nice-Sophia Antipolis, 28 Novembre 2007.
- [9] V. TAROKH and H.JAFARKHANI. "Calderbank. Space-time block codes from orthogonal designs". IEEE Transactions on Information Theory, 45(5) :1456-1467, July 1999.
- [10] O. BERDER. "Optimisation et stratégies d'allocation de puissance des systèmes de transmission multi-antennes". Thèse de Doctorat en électronique, Université de Bretagne Occidentale, 2002.
- [11] A.MAKHOUL. "Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données". Thèse de doctorat en informatique, Université de FRANCHE COMTE, France, 2008.
- [12] <http://www.businessweek.com/datedtoc/1999/9935.htm>. 21 ideas for the 21st century.
- [13] M. ILYAS and I. MAHGOUB. "Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems".Thèse de doctorat en informatique, USA, 2005.
- [14] S. MOAD. " Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil". Memoire de Master recherche informatique. Université : FSIC-Rennes 1, Laboratoire de recherche : DYONISOS-IRISA, 2008.
- [15] A. MANJESHWAR and D. P. AGARWAL. "Apteen : A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks". Parallel and distributed

- processing Symposium. Proceedings International, 2002.
- [16] E.FLEURY, G.CHELIUS et T.MIGNON. "Minimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs ". Thèse de doctorat en informatique. Laboratoire CITI/INSA de Lyon, 2003.
- [17] Z.HAMMACHE et N.SOUFI. "Clusterisation avec équilibrage de charge et routage à basse consommation d'énergie dans les RCFs ". Mémoire Master en informatique, Réseaux et systèmes distribués, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, 2009.
- [18] k.CHEIKH et S.YOUS. "Algorithme d'équilibrage de charge et économie d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil". Mémoire Master en informatique, Réseaux et systèmes distribués, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, juillet 2011.
- [19] W. HEINZELMAN, A. CHANDRAKASAN, and H. BALAKRISHNAN. "Application specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Transactions on Wireless Networking, 2002.
- [20] O. YOUNIS, S. FAHMY. "Heed : A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks". IEEE Transactions on Mobile Computing , 2004.
- [21] The OMNeT++ Discrete Event Simulator System. Available from <http://www.omnetpp.org/>
- [22] M.QIN and R.ZIMMERMANN. "VCA : An Energy-Efficient voting-based clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks ". Journal of universal computer science, 13(1) : 87-109, janvier 2007.
- [23] Z.CHANG-XIAO, Z.TIAN-RAN, L.XIAO-MIN, H. Xiong . " Prediction-based Energy Efficient Clustering Approach for Wireless Sensor Networks". Journal of Convergence Information Technology, Volume 6, Number 4. April 2011.

- [24] V.BYCHKOVSKIY, S.MEGERIAN, D.ESTRIN et M.POTKONJAK. "A collaborative approach to in-place sensor calibration ". In 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks, April 2003.
- [25] P.MARY. " Étude analytique des performances des systèmes radio-mobiles en présence d'évanouissements et d'effet de masque". Thèse de doctorat en informatique. N d'ordre 2008-ISAL-0008 Année 2008.
- [26] V. TAROKH, H. JAFARKHANI, and A. R. CALDERBANK. "Space-Time Block Codes From Orthogonal Designs," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 45, no. 5, pp. 1456-1467, July 1999.
- [27] E.ELNAHRAWY and B.NATH. "Cleaning and querying noisy sensors ". Proceedings of the 2nd ACM international conference on Wireless sensor networks and applications, 2003.
- [28] GloMoSim : Global Mobile Information Systems Simulation Library. Available from <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>
- [29] W.HEINZELMAN, J.KULIK and H.BALAKRISHNAN. "Adaptative protocols for uniformation dissemination in wireless sensor networks". In Proceeding of the 5th annual ACM/IEEE international conference on mobile computing and networking Seattle, Washington, USA, Août 1999.
- [30] K. JAYAWEERA. "Energy Efficient Virtual MIMO-based Cooperative Communications for Wireless Sensor Networks". proceedings of ICISIP, 2005.
- [31] J.HEIDMANN, N.BULUSU and D.ESTRIN. "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices". Technical report 00-729, Computer science departement, University of Southern California, April 2000. 106

- [32] L. X. DAI and Q. ZHOU. "Energy efficiency of mimo transmission strategies in wireless sensor networks, International Conference on Computing". Communications and Control Technologies (CCCT), Austin, TX, USA, August 2004.
- [33] E. LARSSON and P. STOICA. "Space-Time Block Coding for Wireless Communications". Cambridge university press, 2003.
- [34] Y.YUAN, Z.HE and M.CHEN. "Virtual MIMO-Based Cross-Layer Design for Wireless Sensor Networks". IEEE Transactions on Vehicular Technology, VOL. 55, NO. 3, MAY 2006.
- [35] C. S.PARK and K. B. LEE. "Transmit power allocation for BER performance improvement in multicarrier systems". IEEE Trans. Commun.,vol. 52, no. 10, pp. 1658-1663, Oct. 2004.
- [36] W.HEINZELMAN and A.CHANDRAKASAN. "Energy-efficient communication protocol for wireless Micro sensor Networks". In processing of the Hawaii International Conference on System Sciences, Janvier 2000.
- [37] Y.CHALAL. "Réseaux de capteurs sans fils". Mémoire d'ingénieur en informatique, 2008.
- [38] U. S. AITOR, S.SAVAZZI and C. IBARS. " Virtual MIMO Channels in Cooperative Multi-hop Wireless Sensor Networks". Centre Tecnologic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), June 2004.
- [39] H.DAI, L.XIAO and Q.ZHOU. " Energy Efficiency of MIMO Transmission Strategies in Wireless Sensor Networks". Department of Electrical and Computer Engineering, NC State University Raleigh, NC 27695 (919) 513-0299.
- [40] N. BRAVOS and G. KANATAS. "Energy efficiency of MIMO-based Sensor Networks with a Cooperative Node Selection Algorithm". Journal of IEEE Communications 2007.

- [41] A.IFFAN, P. MUGEN, W.WENBO and S.ISMAIL. "Joint rate and cooperative MIMO scheme optimization for uniform energy distribution in Wireless Sensor Networks". Journal of Computer Communications 32 (2009) 1072-1078.
- [42] H.LUO, J.LUO and Y.LIU. "Energy efficient routing with adaptive data fusion in sensor networks". In : Proceedings of the 2005 Joint Workshop on Foundations of Mobile Computing, September 2005.
- [43] N. BRAVOS, G. KANATAS and G.EFTHYMOGLOU. " Energy Efficiency Evaluation of Alternative MIMO - based Sensor Networks". University of Piraeus 2008.
- [44] J.HEIDEMANN, N.BULUSU and D.ESTRIN, "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices", Technical report 00-729, Computer science departement, University of Southern California, April 2000.
- [45] <http://www.e-miage.org/demos/B222/214-1.pdf>
- [46] The Network Simulator ns-2. Available from <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [47] I. Akyildiz, W. Su, E. Cayirci, Y. Sankarasubramaniam. "A survey on sensor networks", IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA. Août 2002.
- [48] M. Younis and T. Nadeem. "Energy efficient MAC protocols for wireless sensor networks", Technical report, university of Mryland baltimre County, USA, 2004.

- [49] M. Ilyas and I. Mahgoub. "Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems", ISBN 08493196864. CRC PRESS LLS, USA, 2005.
- [50] H. Namgoog, D. Lee, and D. Nam. "Energy efficient topology for wireless microsensor networks". ACM, PE-WASUN, October 2005.
- [51] S. Ziane and A. Mellouk. "A swarm intelligent scheme for routing in mobile ad networks". Systems Communications, IEEE, Aug 2005.
- [52] W.Ye, J.Heidemann, and D. Estrin. "Medium access controle with coordinated adaptative sleeping for wireless sensor networks". IEEE, ACM trans.Netw, vol. 12, no.3, pp 493-506, Jun 2004.
- [53] Paolo Santi. "Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks", Hardcover, july 2005.

Résumé

L'efficacité énergétique des transmissions MIMO est particulièrement utile pour les réseaux de capteurs sans fil où chaque nœud doit fonctionner sans échange ou recharge de batterie pendant une longue période de temps et où la consommation d'énergie est la contrainte la plus importante. La coopération entre capteurs est possible, tant à l'émission qu'à la réception pour former un système " MIMO coopératif ". L'algorithme proposé (VM-VCA) repose sur une politique d'équilibrage de la charge de travail entre les nœuds capteurs et d'une technique de coopération dans le but de prolonger la durée de vie du réseau. Son principe est de partitionner le réseau en cluster. Pour cela la sélection des cluster-heads est faite en fonction de l'énergie résiduelle et la distance qui le sépare de la station de base. La transmission des données est assurée par les nœuds coopératifs ainsi qu'une technique de routage. L'évaluation de performances de l'algorithme proposé montre qu'il assure une réduction considérable de l'énergie consommée.

Mots clés

Réseaux de capteurs sans fil, Stratégies MIMO coopératives, Économie d'énergie, Routage, Évaluation de performances.

Abstract

Energy efficiency of MIMO transmissions is especially useful for wireless sensor networks where each node must operate without exchange or recharge the battery for a long period of time and where energy is the main important. The cooperation between sensors is possible on transmission and reception to form a cooperative MIMO system. The algorithm proposed (VM-VCA) based on a policy of the workload balancing between the sensor nodes and a technical cooperation in order to extend the lifetime of the network. Its principle is to partition the network into cluster. For this selection cluster-heads is made according to the residual energy and the distance between nodes. The data transmission is ensured by the nodes and a cooperative technical routing. The performance evaluation of the proposed algorithm shows that it provides a considerable reduction of the energy consumed.

Keywords

Wireless sensor networks, MIMO cooperative strategies, Energy economy, Routing, discret even simulation.