

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira de Béjaia

Faculté des Sciences Exactes

Département d'Informatique



Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme
de Master 2 en informatique
Option : Réseaux et Systèmes Distribués

Thème

Proposition d'une stratégie MIMO (2×2) coopérative pour les Réseaux de capteurs sans fil

Réalisé par :

M^r. MOHAMMEDI Mohamed

M^{elle}. MOULAI Lila

Encadré par :

M^{elle}. KHOULALENE Nadjet

Devant le jury composé de :

Président	<i>M^r.</i> LARBI Ali	MAA	Université de Béjaia
Examineurs	<i>M^r.</i> KHANOUCHE Mohamed-Essaid	MAA	Université de Béjaia
	<i>M^{me}.</i> LAHLAH Souad		Université de Béjaia

Promotion 2012-2013

Remerciement

Nos vifs remerciements vont d'emblée à Dieu tout puissant qui nous a doté d'une grande volonté et d'un savoir adéquat pour mener à bien ce travail.

Nos remerciements sont adressés également à M^{elle} KHOULLAËNE Nadjat pour son encadrement et pour l'encouragement et l'intérêt qu'elle nous a apporté pour l'accomplissement de ce projet de fin de cycle et surtout pour sa grande aide et ses qualités humaines.

Nous poursuivons ces remerciements en saluant vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.

Un énorme merci à M^{elle} BOUADEM Nassima pour la qualité de sa collaboration.

Nous n'omettrons jamais d'exprimer toute notre gratitude à tous les membres du département d'informatique de l'université de Béjaïa, que ce soit enseignants ou cadres administratifs, qui de près ou de loin n'ont épargné aucun effort pour que notre formation et nos travaux se termine dans de bonnes conditions.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à la mémoire de mon oncle Bachir et de mes grands
parents.*

*À mes chers parents qui m'ont donné un magnifique model de labeur et de
persévérance tout au long de mon cursus et pour m'avoir apporté un grand
support moral lors de la rédaction de ce mémoire.*

*À mon frère et mes sœurs pour leurs conseils, leur aide morale et leur
simple présence à mes côtés.*

À toute ma famille.

À mon binôme Mohamed.

À tous mes ami(e)s en particulier Soussou.

Lila

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*À mes chers parents, pour tous les sacrifices consentis à mon égard et leur
énorme soutien.*

À ma copine

À mes sœurs

À toute ma famille

À mon binôme Lila

À mes amis (es) et collègues

À tous ceux que j'aime....

Mohamed

Liste des Acronymes

ADC	A nalogical D igital C onverter
ADSL	A symmetric D igital S uscriber L ine
BBAG	B ruit B lanc A dditif G aussien
BER	B it E rror R ate
BLAC	B attery- L evel A ware C lustering
BLAST	B ell L aboratories layered S pace- T ime
BPSK	B inary P hase S hift K eying
CBS	C anal B inaire S ymétrique
CH	C luster H ead
CITI	C entre d'Innovation en T élécommunications et I ntégration de services
CN	C oopérative N ode
CSMA	C arrier S ense M ultiple A ccess
CSI	C hannel S tate I nformation
DCN	D ata C ollection N ode
DGN	D ata G athering N ode
DSP	D igital S ignal P rocessing
D-BLAST	D iagonal B ell L aboratories layered S pace- T ime
GPRS	G eneral P acket R adio S ervice
GPS	G lobal P ositioning S ystem
HEED	H ybrid E nergy- E fficient D istributed
H-BLAST	H orizontal B ell L aboratories layered S pace- T ime
ID	I Dentification

IFA	I ntermediate F requency A mplifier
INSA	I nstitut N ational des S ciences A ppiquées
KB	K ilo B it
LEACH	L ow E nergy A daptive C lustering H ierarchy
LNA	L ow- N oise A mplifier
MAC	M edium A ccess C ontrol
MEMS	M icro- E lectro- M echanical S ystems
MIMO	M ultiple I nput M ultiple O utput
MISO	M ultiple I nput S ingle O utput
MOS	An object-oriented M O perating S ystem
NesC	N etwork embedded system C
PAR	P eak-to- A verage R atio
PBEEC	P rediction- B ased E nergy E fficient C lustering
PEGASIS	P ower E fficient G Athering in S ensor I nformation S ystems
P_{PA}	P uissance consommée par l'amplificateur
P_C	P uissance consommée par les blocs de circuits
QAM	Q uadratique A mplitude M odulation
QoS	Q uality of S ervice
RCSF	R éseau de C apteurs S ans F il
RF	R adio F réquence
RSSI	R ecieved S ignal S trong I ndicator
SB	S tation de B ase
SD	S election D iversity
SIMO	S ingle I nput M ultiple O utput
SINR	S ignal-to- I nterference-plus- N oise R atio
SISO	S ingle I nput S ingle O utput
SNR	S ignal to N oise R atio
SOS	An object-oriented S O perating S ystem
STBC	S pace T ime B lock C ode
STTC	S pace T ime T rellis C ode

TDMA	T ime D evision M ultiple A ccess
TEB	T aux d' E rreur B inaire
TinyOS	T iny micro threading O perating S ystem
TP	T ransmission P ower
V-BLAST	V ertical B ell L aboratories layered S pace- T ime
VCA	An Energy-Efficient V oting C lustering A lgorithm for Sensor Networks
WSN	W ireless S ensor N etwork

Table des matières

Liste des Acronymes	i
Table des matières	iv
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Introduction Générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	5
1.1 Introduction	5
1.2 Définition d'un nœud capteur	6
1.3 Architecture d'un nœud capteur	6
1.3.1 Architecture matérielle	6
1.3.2 Architecture logicielle	9
1.4 Caractéristiques d'un capteur	10
1.5 Les réseaux de capteurs sans fil	11
1.5.1 Définition d'un réseau de capteurs sans fil	11
1.5.2 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil	11
1.5.2.1 Les réseaux de capteurs plats	12
1.5.2.2 Les réseaux de capteurs hiérarchiques	12
1.5.3 Le déploiement	13
1.5.4 La couverture de surface et la collecte de données	13
1.6 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil	14
1.6.1 Topologie dynamique	14
1.6.2 Auto organisation	14
1.6.3 Scalabilité	15

1.6.4	Bande passante limitée	15
1.6.5	Gain de densité	15
1.6.6	Gain de diversité	16
1.6.7	Réduction des interférences	16
1.7	Communication dans les réseaux de capteurs sans fil	16
1.7.1	La pile protocolaire	16
1.7.1.1	Le niveau de gestion d'énergie	18
1.7.1.2	Le niveau de gestion de mobilité	18
1.7.1.3	Le niveau de gestion des tâches	18
1.7.2	Types de communications	18
1.8	Facteurs et contraintes de conception d'un RCSF	20
1.8.1	La tolérance aux pannes	20
1.8.2	La consommation d'énergie	20
1.8.3	Les coûts de production	21
1.8.4	La topologie dynamique	21
1.9	Applications des réseaux de capteurs sans fil	22
1.9.1	Applications militaires	22
1.9.2	Applications environnementales	22
1.9.3	Applications médicales	23
1.9.4	Applications industrielles	23
1.10	Conclusion	24
2	Routage et économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil	25
2.1	Introduction	25
2.2	Consommation d'énergie dans les RCSFs	26
2.2.1	Phase de captage	26
2.2.2	Phase de traitement de données	26
2.2.3	Phase de communication	27
2.3	Contrainte de l'énergie dans un RCSF	28
2.4	Métriques d'énergie usuelles	29
2.4.1	Puissance de transmission du nœud émetteur	29
2.4.2	Coût énergétique du saut	31
2.4.3	Puissance de transmission et coût énergétique	31
2.5	Routage avec prise en compte de l'énergie	31
2.5.1	Routage avec réduction de données	31
2.5.2	Routage sans réduction des données	32

2.6	Les approches de routage dans les RCSFs	33
2.6.1	Classification selon la structure du réseau	34
2.6.2	Classification selon les fonctions du protocole	35
2.6.3	Classification selon l'établissement de la route du réseau	35
2.6.4	Classification selon l'initiateur de communication	36
2.7	Les protocoles de routage hiérarchiques	36
2.7.1	LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)	37
2.7.2	PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)	38
2.7.3	HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed approach)	38
2.7.4	TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network)	39
2.7.5	BLAC (Battery-Level Aware Clustering)	40
2.7.6	VCA (An Energy-Efficient Voting Clustering Algorithm for Sensor Networks)	41
2.8	Conclusion	43
3	Etat de l'art sur les stratégies MIMO proposées pour les RCSFs	45
3.1	Introduction	45
3.2	Description de la technologie MIMO	46
3.3	Les systèmes MIMO	47
3.3.1	Systèmes MIMO non coopératifs	47
3.3.2	Systèmes MIMO coopératifs	47
3.4	Canaux de transmission	49
3.4.1	Canal binaire symétrique	49
3.4.2	Canal à bruit additif blanc gaussien	50
3.4.3	Canal à évanouissements	51
3.5	Codes spatio-temporels	51
3.5.1	Codes spatio-temporels en treillis (STTC)	52
3.5.2	Codes spatio-temporels par blocs (STBC)	52
3.6	Codes spatio-temporels par blocs orthogonaux	53
3.6.1	Code spatio-temporel par blocs d'Alamouti	54
3.6.2	Codes spatio-temporels par blocs de Tarokh	56
3.7	Multiplexage spatial	56
3.7.1	H-BLAST	57
3.7.2	D-BLAST	57
3.7.3	V-BLAST	57
3.8	Notion de diversité	58
3.8.1	Diversité temporelle	59

3.8.2	Diversité fréquentielle	60
3.8.3	Diversité spatiale	61
3.9	Principales caractéristiques des systèmes multi-antennes	62
3.9.1	Expression de la capacité	62
3.9.2	Influence du milieu de propagation	63
3.10	Applications envisagées	63
3.11	Techniques MIMO pour la minimisation de la consommation d'énergie dans les RCSFs	64
3.11.1	Energy efficient virtual MIMO-based cooperation communication in wireless sensor networks	64
3.11.2	Uniform Energy Consumption through Adaptive Optimal Selection of Cooperative MIMO Schemes in Wireless Sensor Networks	68
3.11.3	Cooperative node selection for virtual MIMO in wireless sensor networks	73
3.11.4	Virtual MIMO Channels in Cooperative Multi-hop Wireless Sensor Networks	76
3.11.5	Optimal Design of Virtual MIMO for WSN Performance Improvement	81
3.11.6	The Energy Efficient Cooperative MIMO Technique for Hierarchical Clustering Protocol	83
3.11.7	A Joint Energy-balanced Organizing Scheme with Hexagon-Clustered Algorithm and Cooperative MIMO for WSNs	87
3.11.8	Energy efficiency of virtual MIMO transmission schemes for cluster-based wireless sensor networks	91
3.11.9	V-BLAST-Based Virtual MIMO for Distributed Wireless Sensor Networks	96
3.12	Conclusion	99
4	Proposition d'une stratégie MIMO (2×2) coopérative pour les RCSFs	101
4.1	Introduction	101
4.2	Motivation	102
4.3	Principe de la Proposition	103
4.3.1	Phase de formation des clusters	103
4.3.2	Phase de sélection des nœuds coopératifs	106
4.3.2.1	Exemple de sélection des nœuds coopératifs émetteurs et nœuds coopératifs récepteurs	109
4.3.3	Description de la de transmission des données intra-cluster et inter-clusters	112
4.3.3.1	Communication intra-clusters	112
4.3.3.2	Communication inter-clusters	113
4.4	Conclusion	114

5	Simulation et évaluation de performances	115
5.1	Introduction	115
5.2	Métriques considérées	116
5.3	Les paramètres de simulation	117
5.3.1	Description du système	117
5.3.2	Modèle d'énergie	117
5.4	Scénarios de simulation	119
5.4.1	Variables descriptives du système	119
5.4.2	Évènements discrets du système	121
5.5	Evaluation de performances	122
5.5.1	Nombre moyen de clusters	123
5.5.2	Nombre moyen de nœuds capteurs par cluster	124
5.5.3	Nombre moyen de clusters solitaires	125
5.5.4	Nombre moyen de nœuds coopératifs par cluster	127
5.5.5	Énergie Consommée	128
5.5.6	Probabilité de réception des données	130
5.5.7	Conclusion	131
Conclusion Générale		133
Bibliographie		135

Table des figures

1.1	Capteur WSN430 développé au laboratoire CITI	6
1.2	Architecture matérielle d'un nœud capteur	9
1.3	Rayons de communication et de sensation d'un capteur	10
1.4	Architecture générale d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF)	12
1.5	La pile protocolaire d'un réseau de capteurs	17
1.6	Les types de communication dans un réseau de capteurs	19
2.1	Consommation d'énergie en capture, traitement et communication [72]	28
2.2	Choix du prochain nœud minimisant la puissance de transmission du nœud émetteur.	30
2.3	Les approches de routage dans les réseaux de capteurs [56].	34
2.4	Routage hiérarchique.	37
2.5	La hiérarchie des clusters dans TEEN [5].	40
3.1	Canal MIMO avec deux antennes en émission et deux antennes en réception.	46
3.2	Système MIMO coopératif pour les réseaux de capteurs sans fils.	48
3.3	Description d'un canal binaire symétrique.	49
3.4	Canal binaire symétrique.	50
3.5	Système d'Alamouti.	53
3.6	Structure H-BLAST.	57
3.7	Structure D-BLAST.	57
3.8	Multiplexage spatial sur deux antennes.	58
3.9	Structure V-BLAST.	58
3.10	Le même signal est transmis sur plusieurs intervalles temporels.	60
3.11	Le même signal est transmis sur plusieurs intervalles fréquentiels.	61
3.12	Les communications MIMO virtuelles dans le réseau de capteurs sans fil.	66
3.13	Modèle de consommation d'énergie du cluster j.	71

3.14 Scénario de la simulation.	72
3.15 Architecture du modèle.	74
3.16 Clusters coopératifs dans un réseau de capteurs sans fil multi-sauts.	77
3.17 Le schéma de transmission cluster à cluster.	79
3.18 Cluster basé sur un schéma MIMO virtuel pour le RCSF.	82
3.19 Transmission de données vers la station de base.	85
3.20 Déploiement du réseau selon le modèle proposé.	88
3.21 Le modèle du système proposé pour la transmission MIMO.	92
4.1 Protocole BLAC : Découverte des voisins.	105
4.2 Protocole BLAC : Rattachement des capteurs aux cluster-heads	105
4.3 BLAC-MIMO : Réseaux MIMO virtuel.	108
4.4 Sélection des nœuds coopératifs émetteurs et nœuds coopératifs récepteurs.	111
4.5 Communication intra-clusters.	113
4.6 Communication inter-clusters.	114
5.1 Variation du nombre de clusters formés en fonction de la portée de transmission des capteurs.	123
5.2 Variation du nombre de nœuds capteurs par cluster en fonction de la portée des capteurs.	125
5.3 Variation du nombre de clusters solitaires en fonction de la portée des capteurs.	126
5.4 Variation du nombre de nœuds coopératifs en fonction de la portée des capteurs.	127
5.5 Variation de la quantité d'énergie consommée durant la phase de clusterisation en fonction de la portée des capteurs.	128
5.6 Variation de la quantité d'énergie consommée par les clusters durant la phase de clusterisation et la phase de transmission de données en fonction de leur portée de transmission.	129
5.7 Variation de la probabilité de réception de données en fonction de la portée des capteurs.	131

Liste des tableaux

5.1	Variables descriptives du système.	120
5.2	Évènements discrets du système.	122

Introduction générale

Aujourd'hui, les progrès réalisés dans les domaines de la micro-électronique et des technologies de communication sans fil permettent de créer de petits systèmes communicants équipés de capteurs à un coût raisonnable. Ces derniers sont devenus des éléments incontournables dans tous les systèmes où les informations issues de l'environnement extérieur sont nécessaires pour évaluer et agir. Le terme capteur utilisé en informatique ne représente pas seulement le composant électronique qui relève des données sur l'environnement telles que la température, l'humidité ou encore d'autres quantités physiques, mais désigne le nœud complet du réseau auquel il est associé. Dans ces systèmes distribués émergents, les nœuds collaborent afin de fournir une vue détaillée de leur environnement, le déploiement de plusieurs d'entre eux en vue de collecter et transmettre des données environnementales vers un ou plusieurs points de collecte appelé(s) puits de manière autonome et à travers un médium sans fil, forme un réseau de capteurs sans fil, ou "Wireless Sensor Network" (WSN).

Dans les réseaux de capteurs, les nœuds sont déployés dans un environnement sans infrastructure, n'ayant aucune information sur la topologie globale même locale du réseau construit. Par conséquent, les capteurs doivent graduellement établir l'infrastructure de communication durant une phase d'initialisation. Cette infrastructure doit leur permettre

de répondre aux requêtes venant des sites distants, d'interagir avec l'environnement physique et de transmettre les données captées via une communication multi-sauts. Il faut noter que les acteurs de ces systèmes diffèrent selon l'application visée et le lieu de déploiement. Cependant, la caractéristique commune à toutes ces applications est l'énergie qui constitue le point critique dans ces réseaux. Les capteurs sont déployés dans des zones généralement inaccessibles, parfois hostiles, et le réseau peut être très dense, comprenant des milliers ou plus de nœuds, ainsi il est difficile, voire même impossible, de remplacer les batteries des capteurs après leur épuisement. Il est donc largement reconnu que la limitation énergétique est une question incontournable dans la conception des réseaux de capteurs sans fil en raison des contraintes strictes qu'elle impose sur l'exploitation du réseau. Au fait, la consommation d'énergie des capteurs joue un rôle important dans la durée de vie du réseau qui est devenue le critère de performance prédominant dans ce domaine. Si nous voulons que le réseau fonctionne de manière satisfaisante aussi longtemps que possible, ces contraintes d'énergie nous obligent à faire des compromis entre différentes activités aussi bien au niveau du nœud qu'au niveau du réseau. A cet effet, plusieurs approches de routage ont été proposées pour conserver la ressource énergétique au niveau des capteurs et pouvoir surmonter les défis inhérents à sa limitation.

Plusieurs travaux de recherche sont apparus pour rependre à cette contrainte, parmi les solutions obtenues, on peut citer l'architecture de transmission/réception basée sur l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception. Ces architectures, dites MIMO (Multiple Input Multiple Output), ont été développées par les laboratoires Bell en 1997 [18], et constitue l'objet de notre étude.

Notre projet se concentre particulièrement sur un objectif principal : une meilleure transmission de données en introduisant des nœuds coopératifs, optimiser la consommation

énergétique des nœuds à travers l'utilisation de techniques de conservation innovantes (Stratégie MIMO (2×2)) afin d'améliorer les performances du réseau, notamment la maximisation de sa durée de vie.

L'objectif dans notre travail est la minimisation de la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil. A cet effet, nous avons proposé d'adapter la stratégie MIMO sur un protocole hiérarchique, qui consiste à regrouper les nœuds capteurs sous forme de clusters, et d'élire deux nœuds coopératifs émetteurs et récepteurs pour former une transmission MIMO inter-cluster.

Ce rapport s'articule donc en cinq chapitres :

Le premier chapitre s'intitule " Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil ", il a pour objectifs de définir les concepts essentiels sur lesquels se base notre travail. Dans ce chapitre, nous décrivons l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil, ainsi que ses caractéristiques. Nous présentons également les contraintes de conception d'un réseau de capteurs et enfin ses domaines d'applications.

Le deuxième chapitre est intitulé "Routage et économie d'énergie dans les RCSFs". Dans ce chapitre, nous présentons de façon générale quelques protocoles développés pour les réseaux de capteurs sans fils. Ces protocoles doivent tenir compte de l'aspect fonctionnel de ces réseaux tout en optimisant les calculs nécessaires pour choisir la route la plus optimale. Nous présenterons également les techniques utilisées pour la conservation d'énergie.

Le troisième chapitre est un " Etat de l'art sur les stratégies MIMO proposées pour les RCSFs". Ce chapitre permet de mettre en évidence la technique MIMO et présenter quelques travaux que nous avons jugés intéressants pour prouver l'amélioration potentielle apportée par ce type d'architecture.

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

l'objet du quatrième chapitre " Proposition d'une stratégie MIMO (2×2) coopérative pour les RCSFs ". Les différentes étapes de l'algorithme proposé seront détaillées dans ce chapitre.

La "Simulation et Evaluation de performances" fera l'objet du cinquième chapitre dans lequel nous exposons les résultats de simulation obtenus.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale résumant les points essentiels qui ont été abordés ainsi que des perspectives que nous souhaitons accomplir prochainement.

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Les avancées récentes dans le domaine de la communication sans fil et les technologies MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ont permis le développement de petits dispositifs peu coûteux, de faible puissance, et qui peuvent communiquer entre eux, appelés capteurs. Ces dispositifs coopèrent entre eux pour former une infrastructure de communication appelée réseau de capteurs. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ces derniers peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique, appelée champ de captage correspondant au terrain d'intérêt pour le phénomène capté. Ces capteurs sont capables de recueillir, traiter et acheminer les données environnementales de la région surveillée d'une manière autonome, vers des stations de collecte appelées nœuds puits ou stations de base.

Dans ce chapitre, nous allons faire une description synthétique des réseaux de capteurs, leurs architectures, leurs caractéristiques, leurs domaines d'application, les contraintes de conception d'un tel type de réseau ainsi que les types de communication utilisés.

1.2 Définition d'un nœud capteur

Un capteur est un composant miniature, multifonctionnel capable d'effectuer de simples mesures sur son environnement immédiat, telles que la température, les vibrations et la pression. Cet appareil est augmenté de capacités de calcul, de communication et de batteries lui conférant ainsi une autonomie [48] [93]. Le terme capteur intelligent (smart sensor ou intelligent sensor) a été utilisé dans l'industrie des capteurs pour désigner des capteurs qui ne fournissent pas seulement des mesures, mais aussi une fonctionnalité aux mesures spécifiques [89].

La figure 1.1 montre un capteur WSN430 [40] développé au sein du Centre d'Innovation en Télécommunications et Intégration de Services (CITI), à l'INSA de Lyon.



FIGURE 1.1 – Capteur WSN430 développé au laboratoire CITI

1.3 Architecture d'un nœud capteur

1.3.1 Architecture matérielle

Un nœud capteur est composé de quatre éléments ou modules de base qui sont : l'unité de captage (Sensing Unit), l'unité de traitement (Processing Unit), l'unité de transmission (Transceiver Unit) et l'unité de contrôle d'énergie (Power Unit).

- **Unité de captage** : elle est généralement composée de deux sous-unités : le capteur lui-même et un convertisseur Analogique/Numérique. Le capteur est responsable de

fournir des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement [56].

- **Unité de traitement** : composée d'un processeur et d'une mémoire intégrant un système d'exploitation spécifique (TinyOS, par exemple). Cette unité possède deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de communication. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de communication. Cette unité est également chargée d'exécuter les protocoles de communication qui permettent de faire collaborer le capteur avec d'autres capteurs. Elle peut aussi analyser les données captées [39].
- **Unité de transmission** : composée d'antennes, elle est chargée d'effectuer toutes les émissions et les réceptions de données sur un support de transmission sans fil. L'unité de transmission, qui est un élément de base, peut-être de type optique. Les communications de ce type sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Par conséquent, elles ne peuvent pas établir de liaisons à travers des obstacles. Ces communications peuvent être également de type radiofréquence. Les unités de transmission de type radiofréquence comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage, ce qui implique une augmentation de la complexité et du coût de production du micro-capteur. L'autre alternative serait d'utiliser de longues antennes, mais ceci n'est pas possible à cause de la taille réduite des micro-capteurs [56]. Certaines études ont suggéré des modèles statistiques de propagation radio prenant en compte ces différents phénomènes physiques. Par exemple, le modèle "lognormal shadowing path loss" [82] qui tient

compte des trajets multiples, le modèle "Signal-to-Noise Ratio (SNR)" [63] qui tient compte des bruits de fond sur le signal, ou encore le modèle "Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR)" [63] qui prend en compte les effets d'interférences et de bruits sur le signal. Le modèle "binary disc" est le plus simple des modèles déterministes de communication et est le plus souvent utilisé dans la littérature scientifique pour faciliter les calculs analytiques. Ce modèle suppose que chaque nœud n_i est capable de transmettre ses données à tout nœud se situant dans sa portée de communication noté r_i . Le rayon de communication de chaque nœud varie en fonction du niveau de sa puissance de transmission. De ce fait, on pourra dire que deux nœuds n_i et n_j peuvent communiquer symétriquement si et seulement si la distance Euclidienne qui les sépare est plus petite ou égale au minimum de leurs rayons de communication (i.e. $d(n_i, n_j) \leq \min\{r_i, r_j\}$)[10].

- **Unité de contrôle d'énergie** : elle effectue des opérations de contrôle de l'énergie restante et de mesure de la durée de vie du nœud capteur.

Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique, généralement une batterie, pour alimenter tous ses composants. Cependant, cette ressource énergétique est limitée et dans la plupart des cas irremplaçable. L'unité de contrôle d'énergie constitue donc l'un des systèmes les plus importants, elle est responsable de répartir l'énergie sur les autres modules et de réduire les dépenses énergétiques (par la mise en veille des composants inutiles, par exemple). Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules solaires [48].

En plus des quatre éléments cités ci-dessus, il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants qui s'ajoutent à ceux décrits précédemment, comme :

- **Système de localisation (Location Finding System)** : il fournit des informations sur la localisation requise par les techniques de routage.
- **Mobilisateur (Mobilizer)** : il est appelé si le nœud capteur doit se déplacer pour accomplir la requête à traiter.

La figure 1.2 décrit de façon globale l'architecture matérielle d'un nœud capteur.

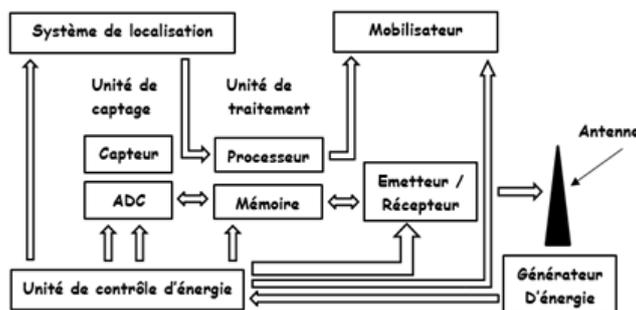


FIGURE 1.2 – Architecture matérielle d'un nœud capteur

Où ADC (Analogical Digital Converter) est un Convertisseur Analogique Numérique.

1.3.2 Architecture logicielle

Pour que les capteurs puissent supporter différentes opérations, des techniques "open-source" se sont associées au succès avéré des RSCFs. Ces systèmes d'exploitation conçus spécifiquement pour ces réseaux utilisent une architecture basée sur les composants. Cela permet une implémentation et une innovation rapide et un code source de taille réduite. Plusieurs systèmes d'exploitation ont été développés pour répondre aux contraintes particulières des réseaux de capteurs sans fil. Parmi ces systèmes, nous citons TinyOS [36], MOS [37], SOS [54], etc. TinyOS est un système d'exploitation, dédié pour les réseaux de capteurs sans fil le plus répandu. Il est développé et soutenu par l'université américaine de Californie à Berkeley. Il propose à l'utilisateur une gestion très précise de la consommation du capteur et permet de mieux s'adapter à la nature aléatoire de la communication sans

fil entre interfaces physiques. Ainsi, lorsqu'aucune tâche n'est pas active, le capteur se met automatiquement en veille [48] [91] [46]. Le système, les bibliothèques et les applications de TinyOS ont été programmés en langage NesC [11] qui est conçu spécialement pour les capteurs sans fil et donc répond à leurs exigences en terme de ressources. Il utilise un fonctionnement évènementiel différent du fonctionnement dit temporel où les actions du système sont gérées par une horloge.

1.4 Caractéristiques 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 mesure et l'unité de communication qui réalise la transmission de celle-ci vers d'autres dispositifs électroniques. Ainsi, fonctionnellement chaque capteur possède un rayon de communication (R_c) et un rayon de sensation (R_s). La figure 1.3 montre les zones de ces deux rayons d'un capteur A. La zone de communication est la zone où le capteur A peut communiquer avec les autres capteurs (le capteur C). D'autre part, la zone de sensation est la zone où le capteur A peut capter l'évènement (le capteur B).

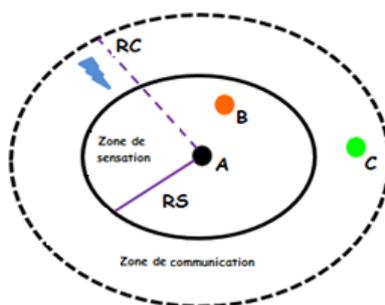


FIGURE 1.3 – Rayons de communication et de sensation d'un capteur

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 im-

portante, ainsi diminuer la consommation d'énergie requise pour l'accomplissement de certaines tâches et prolonger la durée de vie du réseau représentent un défi permanent dans les réseaux de capteurs sans fil [47]. D'autres caractéristiques relatives aux capteurs sont leurs tailles réduites, leur très faible consommation électrique, et surtout leur capacité à communiquer sans fil qui représente un avantage important dans la mesure où elle permet une grande liberté de mouvement par rapport aux nœuds filaires. Il existe dans le monde plusieurs fabricants de capteurs. Nous citerons Crossbow, Cisco, Dalsa, EuroTherm, et Sens2B. 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 [55].

1.5 Les réseaux de capteurs sans fil

1.5.1 Définition d'un réseau de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) ou Wireless Sensor Networks (en anglais) sont constitués d'un ensemble de nœuds déployés en grand nombre de manière aléatoire formant une zone de couverture en vue de collecter et de transmettre des données vers un point de collecte appelé nœud puits (ou Sink), par l'intermédiaire d'une architecture multi-sauts et ce de façon autonome. Le Sink transmet ensuite ces données par internet ou par satellite à l'ordinateur central "centre de traitement des données" pour analyser ces données et prendre des décisions [88].

1.5.2 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

L'architecture d'un réseau de capteurs sans fil est illustrée dans la figure 1.4 Il existe deux types d'architectures pour les réseaux de capteurs : les réseaux de capteurs plats et les réseaux de capteurs hiérarchiques.

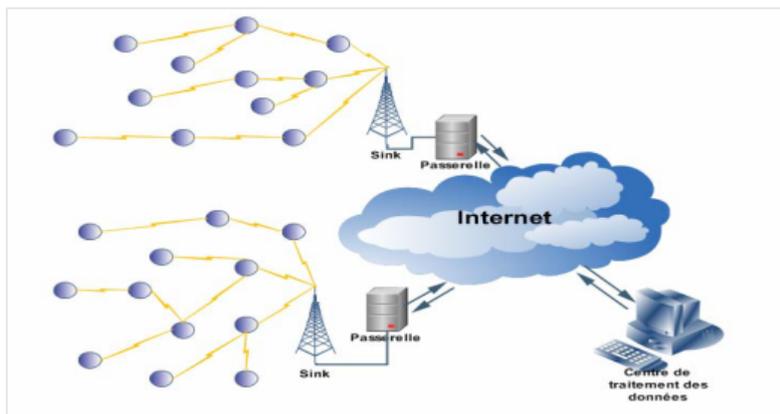


FIGURE 1.4 – Architecture générale d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF)

1.5.2.1 Les réseaux de capteurs plats

Un réseau de capteurs plat est un réseau homogène, où tous les nœuds sont identiques en termes de ressources et de fonction, 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.

1.5.2.2 Les réseaux de capteurs hiérarchiques

Le point clé dans un réseau de capteurs hiérarchique est la différenciation entre les nœuds du réseau. Cette distinction peut se faire au niveau physique ou au niveau logique :

- **Au niveau physique** : lorsqu'il y a une différenciation au niveau matériel, les nœuds sont hétérogènes et différents de par leurs capacités et fonctionnalités. De ce fait, certains nœuds disposent de caractéristiques supplémentaires et peuvent réaliser des tâches plus complexes que d'autres nœuds. Cependant, il existe un coût supplémentaire, au niveau du prix et de la consommation énergétique, pour les dispositifs ayant plus de fonctionnalités.
- **Au niveau logique** : dans un réseau homogène les nœuds peuvent également être hiérarchisés selon leurs fonctionnalités. Dans un découpage en clusters, par exemple,

permettant de partitionner le réseau et donc de le structurer, certains nœuds appelés cluster-heads ou encore têtes de clusters ont pour rôle d'organiser leurs clusters respectifs. Les cluster-heads qui sont des nœuds de niveau supérieur dans la hiérarchisation peuvent communiquer exclusivement entre eux.

Cette architecture est proposée pour réduire le coût de la plupart des nœuds capteurs. Elle consiste à introduire un ensemble de nœuds particuliers, en créant une infrastructure qui décharge la majorité des nœuds simples à faible coût de plusieurs fonctions du réseau [16] [53].

1.5.3 Le déploiement

Le déploiement constitue la première étape de la mise en place d'un réseau de capteurs. C'est une étape, tout comme l'analyse des informations collectées par la station de base, qui nécessite une intervention humaine. Ce déploiement peut se faire de deux manières :

- **Déterministe** : c'est-à-dire que la position des capteurs est bien déterminée et donc connue à l'avance.
- **Aléatoire** : dans ce cas les capteurs s'auto-organisent pour former le réseau.

Les capteurs sont déployés dans le but d'acquérir des informations sur une zone bien précise d'où la nécessité de présenter les caractéristiques de la couverture de surface [53].

1.5.4 La couverture de surface et la collecte de données

La couverture de surface peut être définie comme la capacité des capteurs à surveiller une zone. Les capteurs doivent non seulement couvrir une surface et acquérir des données mais aussi communiquer entre eux pour fusionner, comparer des informations, voire réaliser un routage multi-sauts jusqu'au Sink. Pour pouvoir exploiter les données collectées,

il faut que le graphe soit fortement connexe, c'est à dire qu'il est impératif que tous les nœuds puissent trouver un chemin vers la station collectrice afin de lui transmettre les données collectées [53].

1.6 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs ont beaucoup de caractéristiques importantes. Parmi ces caractéristiques, nous citons :

1.6.1 Topologie dynamique

La topologie instable des réseaux de capteurs est le résultat des trois facteurs essentiels suivants :

- **La mobilité des nœuds** : les nœuds capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent librement et arbitrairement, introduisant ainsi une topologie instable du réseau.
- **La défaillance des nœuds** : celle-ci est dû, entre autres, à l'autonomie énergétique limitée des nœuds. Ainsi, la topologie du réseau n'est donc pas fixée ; les nœuds " morts " sont, d'un point de vue logique, simplement supprimés.
- **L'ajout de nouveaux nœuds** : de nouveaux nœuds peuvent facilement être rajoutés. Il suffit de placer un nouveau capteur qui soit dans la portée de communication d'au moins un autre nœud capteur du réseau déjà existant [16].

1.6.2 Auto organisation

L'auto-organisation s'avère très nécessaire pour ce type de réseau afin de garantir sa maintenance. Vu les différentes raisons résultant une topologie instable du réseau de

capteurs, ce dernier devra être capable de s'auto-organiser pour continuer à assurer ses applications [16].

1.6.3 Scalabilité

La surveillance d'un phénomène peut nécessiter le déploiement d'un nombre de nœuds qui est de l'ordre de plusieurs milliers de capteurs. Suivant l'application, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à des millions de capteurs [35]. Les nouveaux schémas doivent pouvoir garantir un bon fonctionnement avec ce nombre élevé de capteurs, ils doivent aussi exploiter la nature fortement dense des réseaux de capteurs. Un nombre aussi important engendre beaucoup de transmissions inter-nodales et nécessite que le Sink soit équipé d'une mémoire importante pour stocker les informations reçues [16].

1.6.4 Bande passante limitée

En raison de leur puissance limitée, les capteurs ne peuvent pas supporter des débits élevés [70].

1.6.5 Gain de densité

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 [16]. En utilisant plusieurs antennes, la sensibilité de détection du système multi-antennaire est augmentée ce qui accroît la portée du signal. Ainsi pour couvrir une grande surface où la densité de population est faible, il n'est plus nécessaire d'avoir une puissance de signal élevée grâce à la recombinaison des différentes répliques.

1.6.6 Gain de diversité

Le gain de diversité est obtenu grâce aux différents trajets empruntés par les signaux atteignant plusieurs antennes ou partant de plusieurs antennes, dont le but est l'augmentation de la qualité du lien radio où l'on transmet la même information plusieurs fois. Cela a pour conséquence de se prémunir contre les évanouissements du canal.

1.6.7 Réduction des interférences

Dans les communications sans fil, le découpage en cellules permet de limiter l'interférence co-canal. Cependant n'étant pas nulle, elle perturbe quand même les systèmes. L'utilisation de multiples antennes rend la différenciation entre la signature spatiale du signal désiré et le signal du co-canal plus aisée, ce qui réduit l'interférence. Comme pour le multiplexage spatial (voir section 3.7), la connaissance du canal au niveau du récepteur est nécessaire [34].

1.7 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil

1.7.1 La pile protocolaire

La pile protocolaire utilisée par le nœud puits, ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée dans la figure 1.5. Cette pile prend en charge le problème de consommation d'énergie, elle prend en compte la puissance du nœud et l'acheminement à effectuer, communique de façon efficace l'énergie requise et facilite le travail coopératif entre les capteurs. Elle est composée de la couche application, transport, réseau, liaison de données et la couche physique, ainsi que de trois niveaux qui sont : le niveau de gestion d'énergie, le niveau de gestion de tâches et le niveau de gestion de la mobilité.

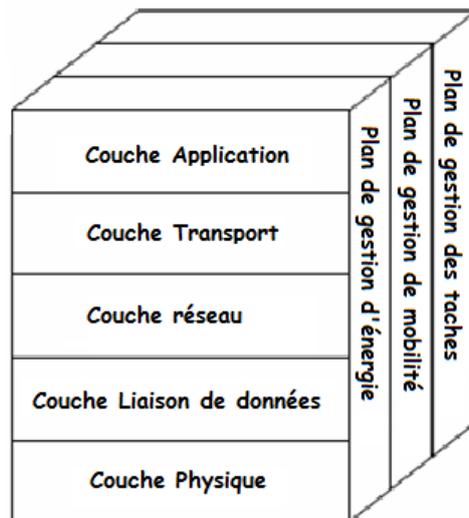


FIGURE 1.5 – La pile protocolaire d'un réseau de capteurs

Suivant la fonctionnalité des capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et bâties sur la couche application. La couche transport, quant à elle, sert à maintenir le flux de données en cas de nécessité dans les applications utilisées, particulièrement lors d'une connexion avec Internet, tandis que la couche réseau s'occupe du routage des données fournies par la couche transport. Comme l'environnement des réseaux de capteurs est bruyant et les nœuds peuvent être mobiles, la couche MAC (Medium Access Control) doit garantir une faible consommation d'énergie et un taux de collision minimum entre les données diffusées par les nœuds voisins. Enfin, la couche physique doit assurer des techniques d'émission, réception et modulation de données, simples mais robustes [27].

Les niveaux de gestion d'énergie, de mobilité et de tâches sont responsables du contrôle de l'énergie consommée, des mouvements des nœuds et de la distribution des tâches à travers toute la pile protocolaire. Ces niveaux permettent aux capteurs de coordonner leurs tâches et minimiser la consommation d'énergie.

1.7.1.1 Le niveau de gestion d'énergie

Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs, dès lors, 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. De plus, un capteur peut, par exemple, éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués [27] [75].

1.7.1.2 Le niveau de gestion de mobilité

Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, d'une manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final et maintenir une image récente sur les nœuds voisins. Cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie.

1.7.1.3 Le niveau de gestion des tâches

Selon la nature des capteurs, leurs niveaux d'énergie et la région dans laquelle ils ont été déployés pour une mission de captage dans une zone donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement être homogènes. Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau et ce afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau [89].

1.7.2 Types de communications

Les nœuds qui transmettent leurs données capturées (nœuds capteurs) et les nœuds qui transmettent les messages aux autres nœuds (nœuds relais ou intermédiaires) sont,

en général, les deux types de nœuds principaux dans un RCSF. Les nœuds intermédiaires aident à l'acheminement des données capturées depuis les nœuds sources jusqu'aux nœuds destinataires, créant ainsi une topologie multi-sauts. Comme illustré dans la figure 1.6, cette organisation logique implique quatre types de communications :

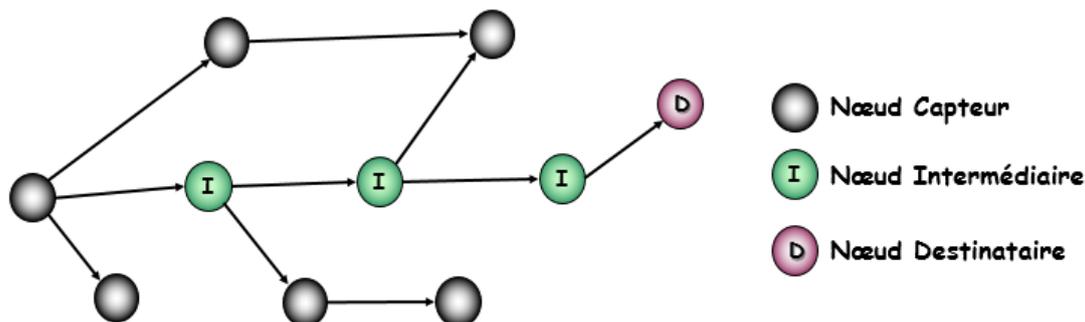


FIGURE 1.6 – Les types de communication dans un réseau de capteurs

- **Communication d'un nœud capteur avec un autre nœud capteur** : c'est un type de communication directe qui est employé pour des opérations locales, tel que lors de l'organisation du réseau en structure cellulaire (clusterisation).
- **Communication d'un nœud capteur avec un nœud intermédiaire** : les données capturées dans ce type de communication sont transmises d'un nœud capteur à un nœud intermédiaire. Ce type de communication est souvent unicast, c'est un mécanisme d'adressage logique qui se base sur un choix explicite d'un seul relais.
- **Communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud capteur** : les requêtes et la signalisation des messages sont diffusées par les nœuds intermédiaires pour atteindre directement un sous-ensemble des nœuds. Ce type de communication est la plupart du temps multicast. Ce dernier est un mécanisme d'adressage logique qui se base sur un choix explicite de plusieurs relais.
- **Communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud intermédiaire** : la communication entre ces nœuds est souvent unicast.

La consommation d'énergie est une métrique primaire à considérer dans les quatre types de communications, dès lors, de nombreuses techniques d'optimisation sont proposées pour minimiser la dépense d'énergie et augmenter la durée de vie du réseau [56].

1.8 Facteurs et contraintes de conception d'un RCSF

Parmi les paramètres qui ont influencés la conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil, nous citons entre autres : la tolérance aux pannes, le coût de production, la topologie du réseau, la consommation d'énergie, le passage à l'échelle, les conditions géographiques, la qualité de service, le déploiement du réseau, etc. Ces facteurs importants servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les réseaux de capteurs. Nous développons quelques-unes de ces contraintes ci-dessous [67] [20].

1.8.1 La tolérance aux pannes

Les nœuds peuvent être sujets à des pannes dues à leur fabrication, la défaillance des nœuds dans un réseau de capteurs peut être engendrée par plusieurs facteurs, notamment l'épuisement d'énergie, l'endommagement physique, ou les interférences liées à l'environnement. La propriété de tolérance aux pannes est définie par l'habilité du réseau à maintenir ses fonctionnalités sans interruptions provoquées par la panne des capteurs. Elle vise donc à minimiser l'influence de ces pannes sur la tâche globale du réseau [42] [67].

1.8.2 La 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 à long terme [67]. Les nœuds capteurs embarquent en général une quantité d'énergie très limitée. Les transmissions de données entre les nœuds consomment beaucoup d'énergie, surtout si des nœuds tombent en panne et qu'il faut réorganiser le RCSF. C'est pourquoi, des algorithmes et des protocoles ont été développés pour ce type de réseaux, ayant pour principal souci l'économie d'énergie, au détriment parfois de la qualité de service fournie par un RCSF.

1.8.3 Les coûts de production

Si le coût d'un nœud capteur est tel que le déploiement d'un réseau revient plus cher que les capteurs traditionnels, alors le RCSF n'est pas justifié économiquement. La minimisation du coût de production du nœud capteur constitue un grand défi mené par les chercheurs, vu les fonctionnalités que doivent comporter ces nœuds et l'objectif désiré pour un coût inférieur pour que la solution RCSF soit économiquement faisable [50] [56].

1.8.4 La topologie dynamique

La mobilité des nœuds, la possibilité d'étendre le réseau par ajout de nouveaux nœuds et la suppression de nœuds défaillants changent fréquemment la topologie des réseaux. Ceci nécessite une maintenance permanente pour assurer le bon fonctionnement des réseaux de capteurs. Il faut donc gérer avec précision la maintenance de cette topologie. On distingue trois phases : le déploiement, le post-déploiement et le redéploiement des nœuds capteurs. Les nœuds capteurs peuvent être disséminés à partir des hauteurs ou placés dans des localisations précises de la zone d'intérêt. Quelle que soit la méthode utilisée, le coût du déploiement doit rester le plus faible possible. A cause des déplacements des nœuds, d'obstacles mobiles ou de brouillages volontaires, des actions post-déploiement peuvent être opérées sur la topologie du RCSF. Des nœuds capteurs peuvent aussi être déployés

dans un deuxième temps pour remplacer ceux tombés en panne ou détruits. La topologie d'un RCSF doit s'adapter à toutes les situations, à savoir les pannes, la mobilité et le rajout des nœuds [43] [16].

1.9 Applications des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil ont trouvés un ensemble très vaste d'applications dans divers domaines, parmi lesquels nous pouvons citer les applications militaires, médicales, environnementales et industrielles [7].

1.9.1 Applications militaires

Le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs, comme c'est le cas pour plusieurs technologies. Le déploiement rapide, l'auto-configuration et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine [20]. Un exemple typique d'application est le déploiement d'un tel réseau dans un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller toutes les activités des forces ennemies [25] ou d'analyser le terrain (par la détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations, par exemple) avant d'y envoyer des troupes.

1.9.2 Applications environnementales

La surveillance de sites naturels ou industriels étendus utilise les réseaux de capteurs qui garantissent l'aspect distribué et une large couverture [33]. Dans ce domaine, nous pouvons mentionner des applications typiques tels que le contrôle des aspects environnementaux qui peuvent affecter les récoltes et le bétail, l'irrigation, les macro-instruments utilisés pour la surveillance des terrains à grande échelle et les explorations planétaires,

la détection chimique et biologique, la détection des incendies dans les forêts, les travaux de recherche météorologiques et géophysiques, la détection des inondations, les études de pollution et la schématisation de la bio-complexité de l'environnement [26].

1.9.3 Applications médicales

L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine de la médecine peut apporter une surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de maladies grâce à des micro-capteurs qui pourront être ingérés ou implantés sous la peau. Comme applications d'avant-garde de ce domaine, nous pouvons énumérer :

- Les micro-caméras qui peuvent être ingérées et sont capables, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain [26].
- La création d'une rétine artificielle composée d'une centaine de micro-capteurs pour améliorer la vision [14].

1.9.4 Applications industrielles

Dans ce domaine, les réseaux de capteurs sans fil offrent une grande flexibilité d'emploi puisqu'ils permettent de s'affranchir des contraintes liées aux câblages. Parmi ces applications, nous pouvons citer comme exemples :

- La surveillance des ouvrages de génie civil pour établir un diagnostic à distance d'une évolution de leur état sans avoir à se rendre sur place pour faire une observation,
- La surveillance de l'état de santé d'un ouvrier ou du risque de le voir exposé à des conditions de travail dangereuses (exemple, exposition à la radioactivité),
- L'observation d'un site susceptible de subir les effets d'une pollution et la construction en temps réel d'une cartographie de sa contamination grâce à des capteurs,

disséminés sur le site, capables de relever les niveaux de pollution et de relayer l'information vers les services spécialisés [20].

1.10 Conclusion

Les caractéristiques qui ont permis aux réseaux de capteurs d'avoir de nouveaux domaines d'applications sont la tolérance aux pannes, hautes capacités de captage, coût réduit, flexibilité, installation rapide, etc. Ces multiples applications feront de cette technologie émergente une partie intégrale de nos vies futures. Toutefois, la satisfaction de certaines contraintes est nécessaire pour la réalisation des réseaux de capteurs. Ces contraintes découlent d'un nombre de facteurs guidant la phase de conception, tel que la consommation d'énergie, le coût, le matériel et la topologie du réseau. Comme ces contraintes sont spécifiques aux réseaux de capteurs, de nouvelles techniques de communication sont nécessaires. Les réseaux de capteurs doivent minimiser la consommation d'énergie de chaque nœud et garantir une bonne qualité de service, par conséquent, l'intégration des mécanismes permettant de s'affranchir de ces contraintes est primordiale pour maximiser la durée de fonctionnement du réseau sans coupures et permettre ainsi aux informations capturées d'atteindre la station de base (Sink), ce qui rend le routage multi-sauts une nécessité. Ce chapitre a été axé sur la présentation des concepts fondamentaux des réseaux de capteurs sans fil, nous avons fait une description de leurs architectures, leurs caractéristiques, leurs domaines d'application, leurs contraintes de conception ainsi que les types de communication utilisés par ce type de réseau.

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.

Routage et économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

2.1 Introduction

La problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil est devenue, ces dernières années, un axe de recherche très important et d'actualité. Comme le déploiement de ces réseaux s'opère dans des zones généralement inaccessibles, parfois hostiles, et le remplacement des batteries épuisées n'est pas envisageable, il est donc par conséquent nécessaire que la diffusion soit la plus économe possible d'un point de vue énergétique afin de maximiser la durée de vie du réseau. Les caractéristiques des réseaux de capteurs, comme la densité importante des nœuds, leurs capacités énergétiques limitées 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 la route la plus optimale.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons au problème d'économie d'énergie dans les RSCSFs. Nous étudierons, les fonctions principales de consommation d'énergie. Puis nous

mettrons en avant les contraintes du routage dans les RCSFs avant de présenter les différentes classes de protocole de routage conçus pour ce type de réseau.

2.2 Consommation d'énergie dans les RCSFs

Le point le plus crucial dans les réseaux de capteurs sans fil est bien la consommation d'énergie, celle-ci influe directement sur la durée de vie du réseau. Sachant que les réseaux de capteurs sont basés sur la communication multi-sauts, chaque nœud a un double rôle ; il capte et/ou mesure l'information, de plus il doit participer au routage des paquets transmis. Tout dysfonctionnement engendre des changements topologiques significatifs et cruciaux, et peut exiger la réorganisation totale du réseau. C'est pour cela que l'économie énergétique est primordiale dans les RCSFs. L'énergie consommée par un capteur est causée par les trois fonctions suivantes : la capture, la communication et le traitement des données [86].

2.2.1 Phase de captage

L'énergie consommée au moment du captage varie suivant la nature de l'application. Un captage à intervalles réguliers consomme moins d'énergie qu'une surveillance continue. La complexité de l'évènement à détecter joue également un rôle crucial pour déterminer la quantité d'énergie consommée. Les environnements contenant un niveau de bruit élevé entraînent l'augmentation de l'énergie nécessaire pour cette phase. Comme le montre la figure 2.1, cette énergie est négligeable par rapport à l'énergie de communication [42].

2.2.2 Phase de traitement de données

L'énergie nécessaire pour les calculs (le traitement) est beaucoup plus faible que l'énergie consommée lors de la communication. L'exemple présenté dans [19] illustre effective-

ment cette disparité. En effet, le coût énergétique nécessaire pour transmettre 1 KB sur une portée de 100 m est approximativement égal à celui nécessaire pour exécuter 3 millions d'instructions à une vitesse de 100 millions d'instructions par seconde. Ce fait favorise largement le traitement local des données pour l'amélioration de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Les nœuds capteurs doivent donc posséder des moyens pour effectuer un traitement local de données, tout en restant capable d'interagir avec les nœuds avoisinants [42].

2.2.3 Phase de communication

Parmi les trois phases citées auparavant, la phase de communication de données est celle qui consomme la plus grande quantité d'énergie. Ceci est dû à la multitude de composants électroniques intégrés au circuit responsable de cette opération. Cette phase implique les deux étapes d'émission et de réception de données. Durant cette phase, il est important de considérer l'énergie nécessaire pour la mise en marche du circuit de communication. Le temps de démarrage, qui est égal à plusieurs centaines de microsecondes, rend l'énergie consommée durant cette période non négligeable. En effectuant cette tâche de communication, le capteur peut fonctionner selon trois modes :

- Le mode Actif où il exécute une fonction ou transmet un message ;
- Le mode Idle où il est seulement à l'écoute d'éventuels messages à recevoir ;
- Le mode Sleep où il est en veille.

La Figure 2.1 montre les différents niveaux de consommation d'énergie en capture, traitement et communication.

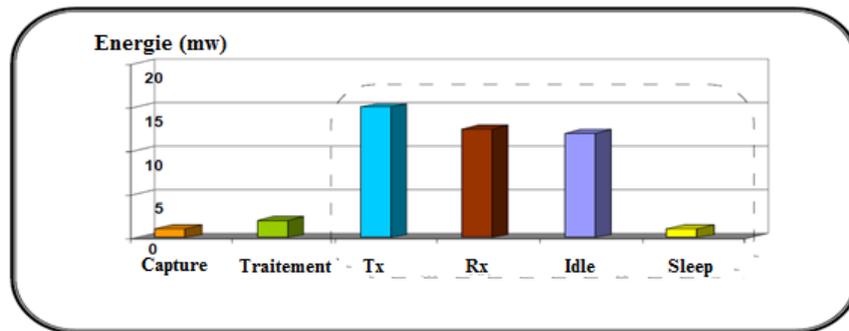


FIGURE 2.1 – Consommation d'énergie en capture, traitement et communication [72]

2.3 Contrainte de l'énergie dans un RCSF

Un nœud capteur est conçu pour être capable de fonctionner durant des mois, voire même des années selon le type de l'application. Comme déjà vu, chaque unité d'un nœud capteur (acquisition, traitement et communication) consomme de l'énergie à des proportions différentes guidées en général par la nature du composant et le type de l'application embarquée sur le nœud qui orchestre le fonctionnement de chacun de ces composants. Par ailleurs les besoins en terme de délais d'acheminement de l'information à destination du puits peuvent être très importants notamment si l'on considère des applications environnementales ou militaires, puisqu'ils affectent directement la consommation d'énergie. Le routage reste donc l'un des principaux défis des concepteurs de protocoles dédiés aux RCSFs. Parmi les diverses sources de consommation d'énergie, nous pouvons :

- **La longueur des chemins de routage** : le chemin que peut suivre un paquet de données d'une source vers une destination peut être représenté par le nombre de sauts que doit traverser ce paquet. Sachant que le coût d'un saut est la fonction du carré de la distance séparant les deux nœuds concernés par la communication, l'énergie consommée par un paquet représente alors la somme des énergies consommées par tous les sauts parcourus entre la source et la destination.

- **La qualité des liens** : les retransmissions de paquets au niveau de la couche liaison de données peuvent accroître le coût énergétique d'une manière significative. Un long chemin avec peu de retransmissions est meilleur qu'un court chemin avec beaucoup de retransmissions.
- **Le routage des paquets inutiles** : certaines applications critiques exigent du protocole de routage une fiabilité et un respect des échéances temporelles des paquets de données. Un paquet dont l'échéance temporelle a expiré avant d'atteindre sa destination, est un paquet inutile pour l'application. Continuer à router un paquet dans le réseau dont les chances d'atteindre la destination sont minimales engendrera une consommation d'énergie inutile [43].

2.4 Métriques d'énergie usuelles

Afin de conserver l'énergie d'un RCSF et/ou prolonger sa durée de vie, plusieurs types de métriques sont utilisés par les protocoles de routage. Nous pouvons trouver des types qui se basent sur la puissance de transmission du nœud émetteur, d'autres utilisent le coût énergétique du saut, comme il est possible de trouver des métriques hybrides. Ce dernier type consiste à combiner la puissance de transmission avec le coût énergétique pour aboutir à un meilleur compromis performance/énergie.

2.4.1 Puissance de transmission du nœud émetteur

La quantité d'énergie requise pour l'envoi d'un message est proportionnelle à la puissance de transmission utilisée par le nœud émetteur [83]. Puisque l'atténuation de la puissance radio, d'un lien sans fil, est généralement proportionnelle au carré de la distance entre l'émetteur et le récepteur, certains protocoles de routage optimisent cette métrique afin de réduire la consommation d'énergie des capteurs.

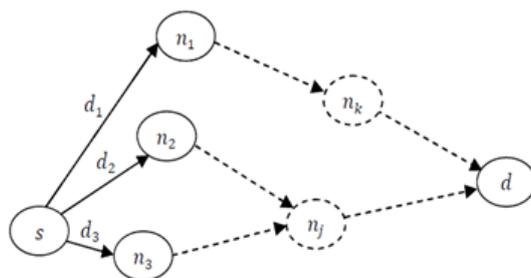


FIGURE 2.2 – Choix du prochain nœud minimisant la puissance de transmission du nœud émetteur.

En se basant sur la puissance de transmission du nœud, dans [28], les auteurs proposent un algorithme de routage localisé où les nœuds prennent des décisions de routage basés sur les localisations géographiques des voisins et de la destination. L'algorithme basé sur la puissance de transmission essaye de réduire au minimum la puissance totale requise pour router un message entre une source et une destination. Le nœud s dans la figure 2.2 choisit comme successeur le voisin n_3 qui lui permet d'ajuster sa puissance de transmission à une valeur minimale p_3 . Ce processus est répété par les nœuds intermédiaires jusqu'à atteindre la destination d . L'algorithme basé sur la puissance de transmission [28] est formalisé comme suit :

Algorithm 1 : Algorithme de routage basé sur les localisations géographiques.

Routage-Puissance(S, d)

Début

$a \leftarrow s$

Répéter

$b \leftarrow a$;

Soit a un voisin de b qui minimise $p_i(b, a)$

Envoyer le message à a

Jusqu'à $a=d$ // Destination atteinte

ou $a=b$; // Transmission échouée

Fin ;

2.4.2 Coût énergétique du saut

L'objectif principal des protocoles de routage qui utilisent le coût énergétique du saut est d'équilibrer l'énergie (c'est-à-dire, la charge énergétique du réseau), de telle sorte que tous les nœuds capteurs épuisent leurs batteries de manière uniforme. Ces protocoles calculent, puis utilisent le coût énergétique pour acheminer un paquet de données généré par une source vers sa destination [28] [83] [32].

2.4.3 Puissance de transmission et coût énergétique

Une solution hybride pour l'économie d'énergie consiste à combiner entre la puissance de transmission de l'émetteur et le coût énergétique du saut du paquet [31] [29] [30] [28]. La manière la plus simple est d'utiliser la somme ou bien le produit entre les deux métriques.

2.5 Routage avec prise en compte de l'énergie

Il existe deux grandes classes de protocoles, ceux de la première classe effectuent des traitements intra-réseau pour éliminer les redondances des données transmises au nœud Sink. Par contre, les protocoles de la deuxième classe tentent d'acheminer vers le nœud Sink toutes les données générées par les sources afin de satisfaire les exigences de l'application.

2.5.1 Routage avec réduction de données

Deux ou plusieurs nœuds qui couvrent une même zone du réseau peuvent transmettre des données décrivant un même évènement. Réduire ces données en termes de volume ou de nombre de paquets à envoyer au nœud collecteur peut avoir un impact majeur sur la consommation d'énergie due à la communication. Parmi les méthodes de réduction de

données, nous trouvons le traitement intra-réseau qui consiste à réaliser de l'agrégation de données (par exemple, calculer la moyenne de certaines valeurs au niveau des nœuds intermédiaires entre la source et le nœud collecteur). La quantité de données est ainsi, réduite en parcourant le réseau vers le nœud collecteur. Une agrégation appropriée de données est spécifique à l'application [17]. La compression de données peut être appliquée également pour réduire la quantité d'informations transmises par les sources du réseau. Cette manière de faire implique d'une part, l'encodage d'informations au niveau des sources génératrices des données et d'autre part, le décodage au niveau du nœud collecteur [9]. La compression de données réduit ainsi la consommation d'énergie liée à la communication et prolonge de ce fait la durée de vie du réseau. Nous distinguons trois principales architectures applicables pour la réduction des données dans les RCSFs, à savoir les clusters, les chaînes et les arbres [73].

2.5.2 Routage sans réduction des données

À l'inverse de l'approche basée sur la réduction des données, une deuxième approche propose d'acheminer tout paquet généré par une source vers sa destination, même s'il y a une redondance dans les données acheminées. Les protocoles de routage basés sur cette approche minimisent l'énergie consommée dans un chemin reliant la source du paquet à sa destination, dans le sens où les nœuds ont le même rôle et ils collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. Les nœuds ont uniquement besoin des informations sur leur voisins directs et cette approche ne nécessite pas d'algorithme complexe pour la phase d'agrégation. Les algorithmes de routage traditionnels, tels que Bellman-Ford ou Dijkstra, optimisent une certaine métrique du réseau, comme la longueur du chemin en énergie, mais exigent une connaissance de toute la topologie du réseau à chaque instant. Le réseau devient ainsi congestionné à cause du trafic généré par les paquets de contrôle engendrant

ainsi des retards aux paquets de données. Bien que les architectures à base de clusters, arbres ou chaînes réduisent la consommation d'énergie dans un RCSF, elles ne sont pas trop efficaces pour les applications de type temps-réel. La réduction des données appliquée dans ces architectures causent trois problèmes majeurs aux protocoles de routage temps-réel, à savoir les données redondantes maximisent les chances d'atteindre le nœud collecteur, les traitements intra-réseau effectués sur les données par les nœuds agrégateurs causent des retards aux paquets transmis aux nœuds collecteurs, et la maintenance de l'architecture adoptée (clusters, arbres ou chaînes) dans des topologies dynamiques exige beaucoup de paquets de contrôle qui viendront surcharger le RCSF.

2.6 Les approches de routage dans les RCSFs

La fonction de routage peut-être définie comme la façon d'acheminer de l'information d'une source à un destinataire à travers un réseau de connexions donné. Un bon routage doit, entre autres, être capable d'acheminer les informations :

- Avec une faible latence ;
- En utilisant peu d'énergie, donc en utilisant les meilleures liaisons de données ;
- En minimisant la charge du réseau, afin de maximiser la quantité totale d'informations pouvant être transmises sur le réseau dans son ensemble ;
- En étant fiable, et en particulier en étant tolérant aux pannes de nœuds du réseau.

Plusieurs protocoles de routage ont été conçus pour les RCSFs. Le principe de fonctionnement de chaque protocole diffère suivant la philosophie de l'approche à laquelle il appartient. Ces approches peuvent être distinguées suivant : la structure du réseau, les fonctions des protocoles, l'établissement des routes et l'initiateur de la communication. La figure 2.3 illustre la classification des différentes approches de routage dans les RCSFs

selon les critères cités ci-dessus.

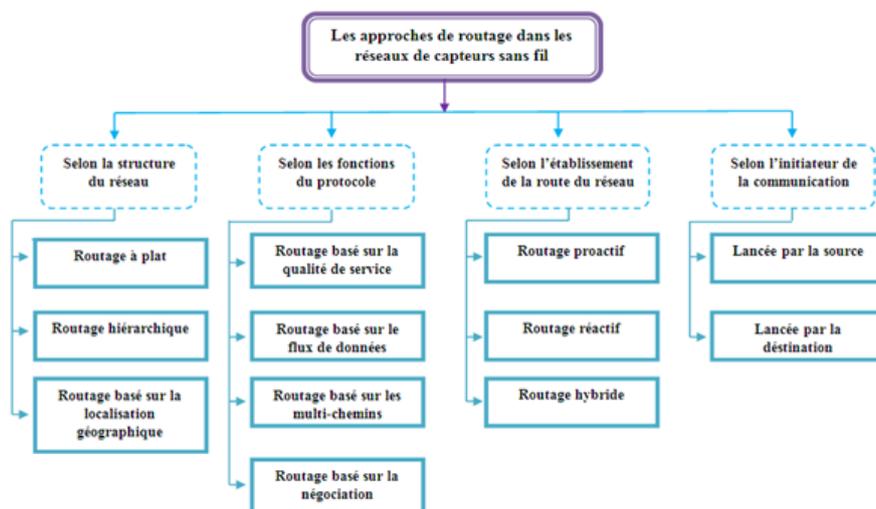


FIGURE 2.3 – Les approches de routage dans les réseaux de capteurs [56].

2.6.1 Classification selon la structure du réseau

Les protocoles de routage basés sur la structure du réseau peuvent être classifiés en trois catégories :

- a) **Routage à plat** : l'idée consiste à éviter que tous les nœuds participent lors de la réception des données. Il définit donc des régions, qui sont sélectionnés grâce à des requêtes, ainsi que les sources, et accessoirement certains protocoles permettent de définir avec précision les routes (optimisées) pour le transfert des données.
- b) **Routage hiérarchique** : le but principal du routage hiérarchique est de maintenir l'efficacité de la consommation d'énergie des nœuds capteurs en les impliquant dans la communication multi-sauts avec un cluster particulier et en performant l'agrégation de données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la destination. Cette catégorie sera développée dans la section 2.7.
- c) **Routage basé sur la localisation géographique** : dans ce dernier cas, une contrainte, selon laquelle les capteurs connaissent leur position (ils peuvent embar-

quer un GPS par exemple), est ajouté ce qui permet de résoudre plus simplement le problème de la sélection des sources (de régions) [44] [70].

2.6.2 Classification selon les fonctions du protocole

Les protocoles de routage peuvent être classifiés selon leurs fonctionnalités en quatre catégories :

- a) **Le routage basé sur la Qualité de Service "QoS"** : dans celui-ci, le réseau doit s'équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité des données. En particulier, le réseau doit satisfaire une certaine métrique de QoS, par exemple, la largeur de la bande passante.
- b) **Le routage basé sur le flux de données dans le réseau** : dans cette approche, la phase d'établissement des routes est modélisée et résolue comme un problème de demande de flux de données où le flot représente la route que les paquets prennent, et la demande représente le taux de production des paquets par les différents nœuds.
- c) **Le routage basé sur les multi-chemins** : comme son nom l'indique, c'est un routage qui utilise des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau.
- d) **Le routage basé sur la négociation** : il utilise des descripteurs de données de niveau élevé afin d'éliminer les transmissions de données redondantes par la négociation. Cette dernière est utilisée aussi pour prendre des décisions de communication en se basant sur les ressources disponibles.

2.6.3 Classification selon l'établissement de la route du réseau

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

- a) **Les protocoles proactifs** : ils essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles au niveau de chaque nœud du réseau.
- b) **Les protocoles réactifs** : ils créent et maintiennent des routes selon les besoins.
- c) **Les protocoles hybrides** : ils combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Un protocole proactif est utilisé pour apprendre le proche voisinage et le protocole réactif pour chercher des routes.

2.6.4 Classification selon l'initiateur de communication

La communication dans un réseau de capteurs peut être lancée par les nœuds sources ou par les nœuds destinataires :

- a) **Communication initié par la source** : dans ce cas, les nœuds envoient des données une fois capturées à la destination.
- b) **Communication initié par le destinataire** : dans ce deuxième cas, les nœuds répondent aux requêtes envoyées par la destination, c'est-à-dire, propager les requêtes à tous les nœuds d'une région topologique et attendre la réception des données du nœud capteur concerné dans cette région [70].

2.7 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 2.4 ; pour que les paquets générés par le nœud F atteignent le nœud L, ils doivent passer par les passerelles P, S et R.

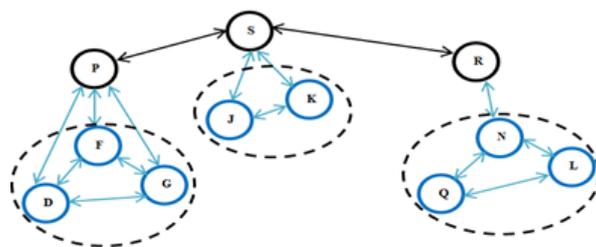


FIGURE 2.4 – Routage hiérarchique.

Le principe des protocoles de routage hiérarchiques 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 dont leurs nœuds qui sont sédentaires et disposent de suffisamment d'énergie, ainsi que l'agrégation des données collectées et une grande scalabilité. Son inconvénient majeur est la surcharge des cluster-heads qui induit un déséquilibre de consommation d'énergie dans le réseau. Pour remédier à ce problème, les cluster-heads peuvent être des capteurs spécifiques avec plus de ressources énergétiques ou bien ils peuvent être élus dynamiquement et ainsi garantir un équilibre de la consommation d'énergie et augmenter la tolérance aux pannes [16]. Dans ce qui suit, nous allons présenter une synthèse de quelques protocoles de routage hiérarchique à basse consommation d'énergie proposés pour les réseaux de capteurs.

2.7.1 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

LEACH [69] est un protocole de routage hiérarchique proposé pour les RCSFs. LEACH, a constitué par la suite une source d'inspiration pour plusieurs autres protocoles, bien que d'autres approches aient été proposées. Dans LEACH, les nœuds s'organisent en clusters. Dans chaque cluster, un nœud agit en tant que cluster-head et tous les autres

nœuds transmettent leurs données à ce dernier. Par ailleurs, chaque cluster-head qui reçoit les données transmises par les membres du groupe, effectue des agrégations sur ces données et envoie les résultats aux puits. Par conséquent, un cluster-head doit posséder plus d'énergie que les nœuds membres. De ce fait, LEACH utilise la rotation aléatoire de la position du cluster-head entre l'ensemble des capteurs du cluster, pour mieux répartir la consommation d'énergie entre tous les nœuds du cluster.

2.7.2 PEGASIS (Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

PEGASIS [90] est une version améliorée du protocole LEACH. PEGASIS forme des chaînes plutôt que des clusters afin que chaque nœud transmette et reçoive uniquement des données d'un voisin. Un seul nœud est sélectionné à partir de cette chaîne pour transmettre les données à la station de base. L'idée de PEGASIS est qu'il fait participer tous les nœuds pour transmettre ou recevoir des données en les déplaçant de nœud en nœud. Les données seront agrégées jusqu'à ce qu'elles atteignent toutes la station de base. Chaque nœud du réseau est tour à tour un chef de file de la chaîne, donc responsable pour transmettre l'ensemble des données recueillies et fusionnées par la chaîne de nœuds à la station de base.

2.7.3 HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed approach)

Dans [49], les auteurs ont proposé un algorithme de clustering distribué pour les réseaux ad hoc appelé HEED. Contrairement aux deux techniques précédentes, HEED ne fait aucune restriction sur la distribution et la densité des nœuds et ne dépend pas de la topologie du réseau ni de sa taille. 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 cluster-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 :

$$P_{CH} = C_{prob} \frac{E_U}{E_{Total}} \quad (2.1)$$

Où E_U est l'énergie résiduelle du nœud u , E_{Total} est l'énergie globale du réseau et C_{prob} est le nombre optimal de clusters à former. Cependant, l'évaluation de E_{Total} présente certaine difficulté à cause de l'absence de toute commande centrale. Un autre problème réside dans la détermination du nombre optimal de clusters. D'autre part, les clusters générés ne sont pas forcément équilibrés en taille. Néanmoins, HEED prolonge la durée de vie du réseau en distribuant l'énergie de la communication et le nombre de CHs d'une façon uniforme.

2.7.4 TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network)

TEEN [5] est un autre protocole de routage hiérarchique conçu pour les réseaux de capteurs. Il est sensible aux changements soudains des attributs et se prête bien aux applications où le temps de réponse est critique. TEEN construit une approche hiérarchique avec l'utilisation d'un mécanisme orienté données suivant le modèle décrit dans la figure 2.5. Il utilise la même stratégie que LEACH pour l'étape de formation des clusters, mais adopte une approche différente pour la phase de transmission des données. Durant cette étape, TEEN utilise deux paramètres définis par l'utilisateur appelés Hard Threshold (HT) et Soft Threshold (ST) et ceci pour pouvoir déterminer le besoin de transmission de la donnée perçue vers la station de base. Le principe adopté est le suivant : si la valeur mesurée dépasse HT, le nœud envoie les données au cluster-head. Si la prochaine valeur captée est supérieure ou égale à HT, le nœud ne transmet ultérieurement que si cette

valeur change avec un pas supérieur ou égal à ST. Ceci permet donc de limiter le nombre de messages émis. Cependant, TEEN suit un comportement réactif et ne fournit pas les données périodiquement.

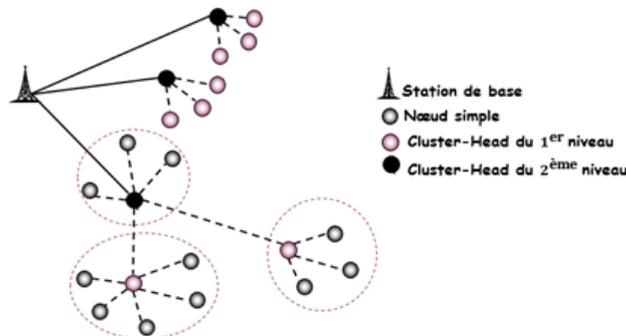


FIGURE 2.5 – La hiérarchie des clusters dans TEEN [5].

2.7.5 BLAC (Battery-Level Aware Clustering)

Dans [76], les auteurs ont proposés un algorithme de clustering appelée BLAC qui considère la combinaison du niveau d'énergie résiduelle à d'autres métriques pour l'élection du cluster-head. Les auteurs introduisent deux variantes de l'algorithme BLAC en fonction de la métrique utilisée : le niveau d'énergie est donc combiné soit avec le degré, il s'agit dans ce cas de la première variante BLAC-bg, soit avec la densité ce qui résulte la seconde BLAC-bs. L'énergie résiduelle $B(u)$ d'un nœud est définie comme suit :

$$B(u) = \frac{batt(u).10}{batt_{cap}} \quad (2.2)$$

Où $batt_{cap}$ est la capacité initiale de la batterie des nœuds (la même pour tous les nœuds) et $batt(u)$ est le niveau de batterie actuel du nœud u .

Le degré est défini par $\delta(u) = |\mathcal{N}(u)|$ avec $\mathcal{N}(u)$ le voisinage de u .

La densité notée $\rho(u)$ est le rapport entre le nombre de liens entre u et ses voisins plus le nombre de liens entre les voisins de u , et le nombre de ses voisins (par définition, le degré de u).

$$\rho(u) = \frac{|(v, w) \in E | v \in \{u, \mathcal{N}(u)\}, w \in \mathcal{N}(u)|}{\delta(u)} \quad (2.3)$$

Dans le protocole BLAC, chaque nœud est équipé d'une puce énergivore GPRS (General Packet Radio Service). Celle-ci étant très gourmand en énergie, il n'est pas judicieux de l'utiliser sur l'ensemble des nœuds du réseau à chaque instant, ainsi seul le Cluster-Head active sa puce. Pour réduire la consommation énergétique de chaque nœud, le réseau est organisé en clusters. Chaque nœud envoie les données à son cluster-head grâce à la liaison radio basse consommation. Lorsque le cluster-head collecte les données, il les agrège et les envoie à la station de base via le GPRS.

2.7.6 VCA (An Energy-Efficient Voting Clustering Algorithm for Sensor Networks)

Le protocole VCA [52] 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.

$$Note_{(i,j)} = \frac{e_i}{\sum_{k \in v_i} e_k} \quad (2.4)$$

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 : à 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 :

$$fitness(i) = \frac{1}{(card(V_i))} \quad (2.5)$$

- Un capteur non attaché choisit donc de rejoindre le cluster dont le cluster-head a un nombre de voisin plus faible.
- Une autre approche (équilibrage par énergie résiduelle), vise à maximiser la durée de vie du réseau. En l'occurrence, il apparait 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 :

$$fitness(i) = \frac{e_i}{(card(V_i))} \quad (2.6)$$

Où :

- $card(V_i)$: est le nombre de voisin du capteur i .
- e_i : est 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.

2.8 Conclusion

La durée de vie d'un réseau de capteurs est étroitement liée à la vie nodale. Cette dernière, quant à elle, dépend essentiellement de la consommation d'énergie du nœud. Comme le routage des données constitue un service de base et que la communication est l'activité la plus consommatrice d'énergie, les protocoles de routage deviennent la cible incontournable des études d'optimisation au niveau capteurs. La technologie des réseaux de capteurs reste très prometteuse, et l'un de leur principal défis est de trouver des protocoles de routage qui permettent, à la fois, de consommer le moins d'énergie possible, d'assurer la connectivité du réseau et la couverture du champ surveillé, d'assurer une livraison fiable et rapide, d'être tolérant aux pannes, et enfin de s'adapter aux changements de topologie. Dans ce chapitre, nous avons entre autre présenté les différentes approches de routage et en particulier quelques protocoles de routage hiérarchiques conçus pour les réseaux de capteurs et dont le principal objectif est d'économiser l'énergie.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons la stratégie MIMO, celle-ci est une technique innovante permettant d'économiser l'énergie et d'augmenter le débit et la robustesse du lien dans les RCSFs. Nous allons également énumérer quelques stratégies MIMO coopératives proposées pour les RCSFs, qui visent à réduire la consommation d'énergie et

maximiser le plus possible la durée de vie de ce type de réseau.

Etat de l'art sur les stratégies MIMO proposées pour les RCSFs

3.1 Introduction

La transmission d'information entre les capteurs ne peut pas toujours 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. Il existe plusieurs techniques de transmission / réception des données parmi lesquelles nous citons SISO, MISO, SIMO et MIMO. Intuitivement, l'approche la plus complexe consiste à utiliser des réseaux d'antennes en émission et en réception en même temps, d'où le nom MIMO (Multiple Input Multiple Output). La technique MIMO est meilleure en termes de gain énergétique. L'utilisation de cette dernière permet potentiellement d'augmenter les performances des systèmes sans fil.

Ce chapitre sera consacré, en premier lieu, à la présentation de la technologie MIMO, puis à la description des techniques de codage spatio-temporel et de multiplexage spatial, ainsi que les principales caractéristiques des systèmes MIMO, et particulièrement la capacité qui les a rendus si attractifs, avant de présenter leur application dans plusieurs systèmes de télécommunications. Par la suite, nous présenterons les principales solutions proposées

dans la littérature basées sur la technologie MIMO pour la gestion de la consommation de l'énergie dans les RCSFs.

3.2 Description de la technologie MIMO

Les systèmes MIMO sont l'un des principaux axes de développement pour augmenter les débits des communications sans fil. Leur particularité réside donc dans l'utilisation simultanée de plusieurs antennes, émettrices et réceptrices. D'autant plus, ces systèmes permettent d'améliorer les performances des appareils et permettent d'atteindre à la fois de très hautes efficacités spectrales et de lutter efficacement contre les évanouissements du signal. L'idée générale est de tirer profit de la dimension spatiale du canal et d'exploiter les trajets multiples plutôt que de les supprimer. En plus, les systèmes MIMO se sont présentés comme une solution pour une consommation plus faible de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil [45] [13].

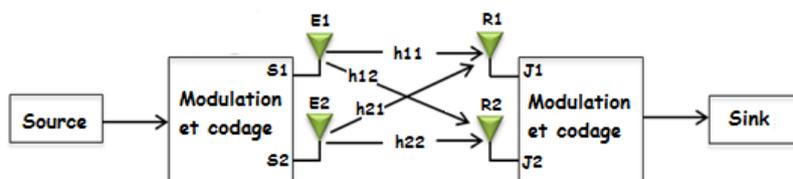


FIGURE 3.1 – Canal MIMO avec deux antennes en émission et deux antennes en réception.

D'après le schéma ci-dessus, nous constatons qu'avec deux antennes de chaque côté, quatre canaux distincts sont créés ($h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$). Lorsqu'un paquet S_1 est envoyé à partir de l'antenne "E1" à destination de "R1" et que le paquet S_2 est envoyé de "E2" pour "R2", à la réception chaque antenne reçoit à la fois ce qui a été envoyé par "E1" et "E2" multiplié par un coefficient complexe en fonction de leur canal. Pour recomposer la trame, il va falloir résoudre un système de deux équations à deux inconnues afin d'isoler

$S1$ et $S2$. Les signaux (trames) reçus par $R1$ et $R2$ aux deux instants consécutifs sont donnés par $J1$ et $J2$ tels que :

$$\begin{cases} J1 = h11 \times S1 + h21 \times S2 \\ J2 = h12 \times S1 + h22 \times S2 \end{cases} \quad (3.1)$$

3.3 Les systèmes MIMO

3.3.1 Systèmes MIMO non coopératifs

Les nouvelles technologies de transmission/réception de données comme les systèmes MIMO, augmentent la largeur de la bande de fréquence grâce au multiplexage spatial (voir section 3.7), et améliorent la fiabilité et la portée du lien sans-fil en exploitant le codage spatio-temporel (voir section 3.5) et la directivité des antennes. Mais, toutes ces améliorations sont réalisables au prix de plusieurs composantes radiofréquences à l'émission et à la réception. Ces dernières communiquent entre elles sans solliciter de nœuds intermédiaires dans le réseau, de plus, la taille des équipements mobiles peut limiter le nombre d'antennes à déployer. Même si la technologie MIMO apporte plusieurs avantages, d'autres contraintes concernant l'allocation des bandes de fréquences sont rencontrées. Avec cette limitation, les bandes de fréquences libres présentent beaucoup d'interférences à cause du grand nombre de nœuds. Afin de résoudre ces problèmes, la notion de coopération est introduite dans les réseaux de capteurs sans fil.

3.3.2 Systèmes MIMO coopératifs

Au lieu d'utiliser une transmission d'information SISO directe d'une source S à un destinataire D sur une distance d , ce qui n'est pas très efficace pour de longues distances, un système MIMO coopératif peut être créé pour économiser l'énergie de transmission

(voir figure 3.2). Du côté émetteur, le nœud S peut coopérer avec ses voisins et échanger ses données (la distance entre 2 nœuds coopérant $d_m \ll d$). Des techniques MIMO comme le multiplexage spatial et codage spatio-temporel sont alors employés pour envoyer simultanément les données au destinataire comme dans un système MIMO classique (chaque nœud coopérant joue le rôle d'une antenne). A la réception, les voisins coopérant reçoivent le signal MIMO modulé et retransmettent leur information respective jusqu'au destinataire en vue de la recombinaison des signaux [78].

Les techniques de coopération profitent de la propriété de diffusion des signaux sans-fil. Le fait que le signal envoyé d'une source vers une destination peut être écouté par les nœuds voisins, permet à ces derniers de traiter le signal écouté et le transmettre vers la destination. Les traitements au niveau des nœuds relais consistent en une répétition du signal écouté (exemple : il s'agira de décoder puis ré-encoder l'information ou bien simplement amplifier le signal reçu avant de le transmettre), ou à des stratégies plus sophistiquées comme relayer seulement une partie de l'information, ou compresser le signal reçu avant de le transmettre [22]. La destination combine les signaux issus de la source et des relais (ou seulement des relais) afin d'augmenter la résistance contre les fluctuations du canal.

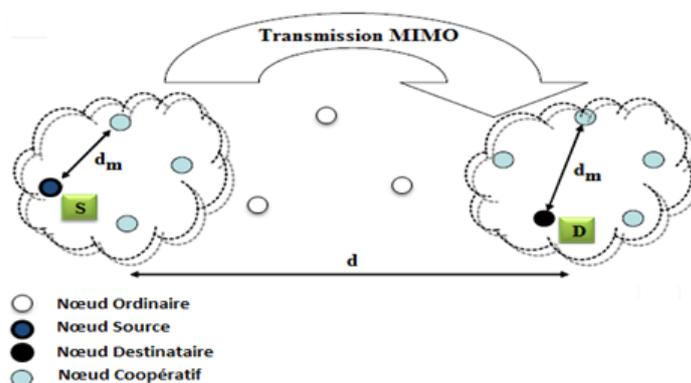


FIGURE 3.2 – Système MIMO coopératif pour les réseaux de capteurs sans fil.

3.4 Canaux de transmission

Un canal est un système physique permettant la transmission d'une information entre deux points distants dans le temps ou l'espace. Dans ce qui suit, nous présenterons quelques canaux de transmission :

3.4.1 Canal binaire symétrique

Le canal binaire symétrique (CBS) est un canal discret dont les alphabets d'entrée et de sortie sont finis et égaux à $\{0, 1\}$. On considère, dans ce cas, que le canal comprend tous les éléments de la chaîne compris entre le codeur du canal et le décodeur correspondant (Figure 3.3).

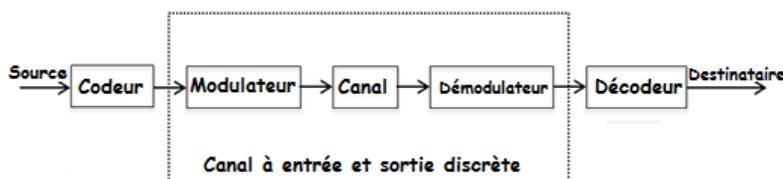


FIGURE 3.3 – Description d'un canal binaire symétrique.

On note respectivement a_K et y_k les éléments binaires de la chaîne à l'entrée et à la sortie du CBS. Si le bruit et autres perturbations causent des erreurs statistiquement indépendantes dans la séquence binaire transmise avec une probabilité P_r , alors [60] :

$$\begin{cases} P_r(y_K = 0|a_K = 1) = P_r(y_K = 1|a_K = 0) = p \\ P_r(y_K = 1|a_K = 1) = P_r(y_K = 0|a_K = 0) = 1 - p \end{cases} \quad (3.2)$$

Le fonctionnement du canal binaire symétrique est représenté dans la figure 3.4. Chaque élément binaire à la sortie du canal ne dépend que de l'élément binaire entrant correspondant, le canal est appelé sans mémoire.

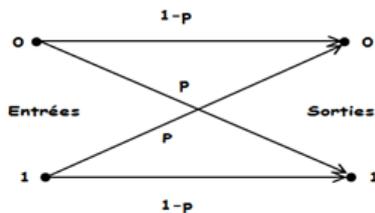


FIGURE 3.4 – Canal binaire symétrique.

3.4.2 Canal à bruit additif blanc gaussien

Le modèle de canal le plus fréquemment utilisé pour la simulation de transmissions numériques, qui est aussi un des plus faciles à générer et à analyser, est le canal à bruit blanc additif gaussien (BBAG). Les canaux gaussiens, de Rice et de Rayleigh [64] sont trois cas particuliers d'un même modèle. Le problème de la construction d'un ensemble de points adaptés au canal gaussien a une formulation géométrique simple, c'est le problème de l'empilement de sphères. Ce bruit modélise à la fois les bruits d'origine interne (bruit thermique dû aux imperfections des équipements...) et le bruit d'origine externe (bruit d'antenne...). Ce modèle est toutefois plutôt associé à une transmission filaire, puisqu'il représente une transmission quasi-parfaite de l'émetteur au récepteur. Le signal reçu s'écrit alors :

$$r(t) = s(t) + v(t) \quad (3.3)$$

Où $s(t)$ représente le signal modulé et $v(t)$ le BBAG, caractérisé par un processus aléatoire gaussien de moyenne nulle, de variance σ_v^2 et de densité spectrale de puissance bilatérale $\Phi_{vv} = \frac{N_0}{2}$.

La densité de probabilité conditionnelle de r est donnée par l'expression :

$$p(r|s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v}} \exp\left\{-\frac{(r-s)^2}{2\sigma_v^2}\right\} \quad (3.4)$$

3.4.3 Canal à évanouissements

Les communications radio ont souvent besoin d'un modèle plus élaboré prenant en compte les différences de propagation du milieu, appelées encore atténuations ou évanouissements, qui affectent la puissance du signal. Cette atténuation du signal est principalement due à un environnement de propagation riche en échos et donc caractérisé par de nombreux multi-trajets, mais aussi au mouvement relatif de l'émetteur et du récepteur entraînant des variations temporelles du canal. Le phénomène de multi-trajets s'observe lorsque l'onde électromagnétique portant le signal modulé se propage par plusieurs chemins de l'émetteur au récepteur [60].

3.5 Codes spatio-temporels

Nous pouvons distinguer deux grandes classes de codage espace-temps permettant l'exploitation de la diversité : le codage spatio-temporel en treillis et le codage spatio-temporel en bloc.

3.5.1 Codes spatio-temporels en treillis (STTC)

Il consiste à coder à l'aide d'une représentation sous forme de treillis (machine d'états) les symboles à transmettre sur les différentes antennes. Le décodage se fait par l'algorithme de Viterbi [3] en minimisant une métrique de vraisemblance cumulée pour choisir le chemin le plus vraisemblable dans le treillis. Il est démontré dans [85] que les codes en treillis peuvent exploiter au maximum la diversité d'émission et de réception tout en offrant un gain de codage qui dépend du nombre d'états du treillis. En contrepartie la complexité du décodage augmente exponentiellement avec le nombre d'antennes en émission et l'ordre de modulation. La complexité de mise en œuvre exclut la mise en pratique de cette technique [13].

3.5.2 Codes spatio-temporels par blocs (STBC)

Le STBC fait partie de la famille des techniques exploitant la diversité espace-temps à l'émission. Cette technique se base sur la diversité d'antennes à l'émission (le schéma original d'Alamouti [74] doté de deux antennes à l'émission) pour construire un schéma de transmission. A la réception, la détection des symboles transmis se fait en combinant différents signaux reçus consécutivement dans le temps. Alamouti a proposé un schéma simple de diversité d'émission, étendu par la suite par Tarohk et al [84].

Les codes spatio-temporels en blocs sont définis comme une opération de modulation d'un bloc de symboles à la fois dans l'espace et dans le temps, créant ainsi des séquences orthogonales transmises par des antennes émettrices différentes. Alamouti a présenté deux systèmes de transmissions, comme le montre la figure 3.5, dotés d'une diversité de deux antennes en émission et en considérant les cas d'une et de deux antennes en réception [60] [4].

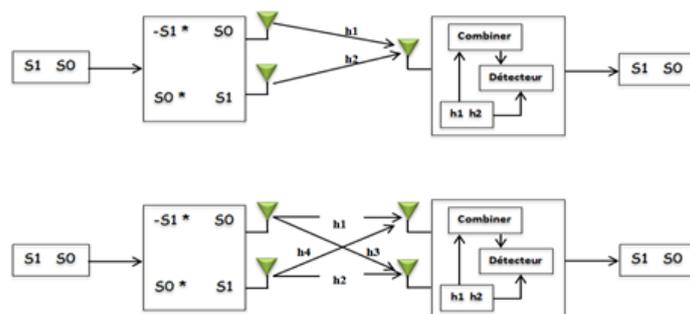


FIGURE 3.5 – Système d'Alamouti.

Où :

- $S1, S0$: est la séquence d'informations.
- $-S1^*, S0, S0^*, S1$: codage de la séquence d'informations à émettre.
- $h1, h2, h3, h4$: sont les coefficients du canal tel qu'indiqué dans la figure 3.5.

Le schéma de transmission proposé par Alamouti, peut se résumer en trois grandes étapes

La première étape décrit la technique de codage de la séquence d'information ($S1 S0$) à émettre. La deuxième étape explique la méthode de combinaison des signaux reçus afin de faciliter la détection des symboles transmis sur la base d'un maximum de vraisemblance qui constitue la dernière étape.

3.6 Codes spatio-temporels par blocs orthogonaux

Les codes STBC orthogonaux sont des codes spatio-temporels en blocs tels que les mots de code sont des matrices orthogonales ou unitaires [24]. Cette propriété permet un décodage linéaire de ces codes ; c'est pourquoi elle est considérée comme leur point fort. Leur point faible est un rendement qui s'écroule lorsque le nombre d'antennes est grand. Le code d'Alamouti est le seul code espace-temps en blocs à exploiter la capacité optimale pour $Nt = 2$ et $Nr = 1$ grâce à son rendement unitaire (rendement égal à 1).

3.6.1 Code spatio-temporel par blocs d'Alamouti

En 1998, Alamouti était le premier à proposer un code espace-temps orthogonal en blocs pour deux antennes en émission à rendement unitaire [64]. Le schéma de codage espace-temps d'Alamouti est optimal pour deux antennes à l'émission et une seule antenne à la réception $n_t = 2$, $n_r = 1$. Un mot de code s'écrit :

$$x = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Où :

- s_1, s_2 : sont deux symboles d'information.
- w_1, w_2 : sont deux variables aléatoires complexes caractérisant le bruit interférent à la réception.
- h_1, h_2 : sont les coefficients des canaux de transmission.
- M_l : consiste à rechercher parmi tous les symboles possibles de la constellation celui qui minimise la distance euclidienne avec le symbole reçu.

Le vecteur reçu s'écrit :

$$[y_1 \ y_2] = [h_1 \ h_2] \cdot \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} + [w_1 \ w_2] \quad (3.6)$$

Les signaux reçus aux instants t et $t + T$ sont donc :

$$\begin{cases} y_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + w_1 \\ y_2 = -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + w_2 \end{cases} \quad (3.7)$$

Soit $z = [y_1 \ y_2^*]^t$ et

$$T = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

on a alors

$$Z = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2^* \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Et

$$T^H \cdot z = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Étant donné que h_1 et h_2 sont décorrélés alors v_1 et v_2 le sont aussi. Une simple détection à seuil permet de retrouver les symboles s_1 et s_2 . Le détecteur M_l (Maximum de vraisemblance) se réduit donc à une détection à seuil. La diversité maximale est atteinte et est égale à 2. Le code d'Alamouti infini peut être obtenu par une construction algébrique. Soit l'algèbre des quaternions de Hamilton H (une algèbre de quaternion $D_{(\beta,\gamma)}(K)$, est une algèbre cyclique de division sur K), $H = D_{-1,-1}(R)$. En prenant :

$$i = \begin{bmatrix} i & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}, j = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, k = ij = \begin{bmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$X \in H$ s'écrit

$$x = a + b_i + c_j + d_k = \begin{bmatrix} a + ib & c + id \\ -(c - id) & a - ib \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Avec $a, b, c, d \in \mathbb{R}$, $s_1 = a + ib$ et $s_2 = c + id$. X est la version transposée du code d'Alamouti.

Le code d'Alamouti est l'unique code de rendement de 1 symbole/uc (Symbole par utilisation canal), de rang plein sur un ensemble fini de \mathcal{C} (ensemble des nombres complexes).

L'unicité de ce code est due au fait que l'algèbre des quaternions de Hamilton est l'unique algèbre de division qui a comme sous-corps maximal le corps des nombres complexes. Avec

$n_r = 1$, le code d'Alamouti atteint la capacité maximale d'un système MIMO. Mais pour $n_r > 1$, le code n'exploite plus tous les degrés de liberté du système, il a une capacité équivalente à un système MIMO $n_t = 2n_r$ et $n_r = 1$. Le code d'Alamouti n'est optimal que pour $n_t = 2$ et $n_r = 1$.

3.6.2 Codes spatio-temporels par blocs de Tarokh

Tarokh et al. ont proposé dès 1999 une méthodologie permettant de construire des codes orthogonaux pour un nombre d'antennes à l'émission supérieur à 2 [64]. Le code d'Alamouti à 2 antennes d'émission a été généralisé par Tarokh afin d'être appliqué à un nombre d'antennes d'émission plus élevé. Tarokh a abouti à des codes espace-temps pour trois et quatre antennes d'émission. Cependant ces codes ont l'inconvénient d'avoir un rendement de code R inférieur au rendement unitaire du code d'Alamouti. Ces codes se nomment $G3$ et $G4$ pour des codes de rendement $R = \frac{1}{2}$ pour, respectivement, trois et quatre antennes. Les codes $H3$ et $H4$ sont des codes de rendement $R = \frac{3}{4}$. D'une façon plus générale, pour K symboles d'information, il existe un code orthogonal tel que, le rendement est égal à $\frac{k}{2^{k-1}}$.

3.7 Multiplexage spatial

Le multiplexage spatial permet de maximiser le débit d'information sur un canal MIMO, il permet également de transmettre des symboles d'information indépendants spatialement (par différentes antennes d'émission) et temporellement (sur des périodes-symboles). Il est introduit sous le nom de BLAST (Bell Labs Layered Space-Time). Cette technique existe sous différentes versions parmi lesquelles nous citons : vertical BLAST, horizontale BLAST, diagonale BLAST.

3.7.1 H-BLAST

Chaque sous-trame d'information est transmise indépendamment par une antenne émettrice (figure 3.6). Ce schéma permet d'exploiter seulement la diversité temporelle à l'émission lorsque les sous-trames sont indépendantes.

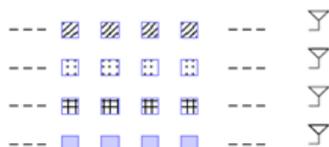


FIGURE 3.6 – Structure H-BLAST.

3.7.2 D-BLAST

Chaque sous-trame d'information est répartie sur une diagonale espace-temps grâce à un entrelaceur espace-temps (figure 3.7). En effet, les symboles codés de chaque couche (sous-trame) sont transmis successivement par chaque antenne émettrice. Ainsi, chaque sous-trame subit tous les évanouissements du canal MIMO. Le multiplexage spatio-temporel permet d'augmenter l'ordre de diversité atteint par les codes D-BLAST.

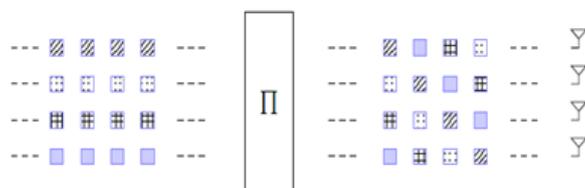


FIGURE 3.7 – Structure D-BLAST.

3.7.3 V-BLAST

La version la plus populaire est la structure V-BLAST (vertical BLAST). La trame binaire à transmettre est divisée en sous-trames. Celles-ci sont ensuite transmises sur

les différentes antennes suivant une répartition verticale. Le flux de données en entrée du multiplexeur est traité, comme le montre la figure 3.8, dans le cas de deux antennes d'émission. Le premier bit est transmis sur la première antenne, le deuxième sur la seconde et ainsi de suite [13].

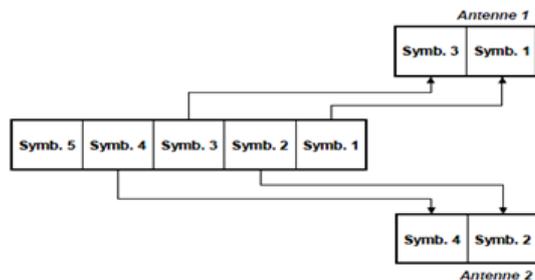


FIGURE 3.8 – Multiplexage spatial sur deux antennes.

Chaque symbole de la trame est transmis par une des antennes émettrices (figure 3.9). Ainsi, ce schéma, comme le schéma D-BLAST, permet d'exploiter la diversité spatiale et/ou temporelle à l'émission, mais il est de complexité plus faible.



FIGURE 3.9 – Structure V-BLAST.

3.8 Notion de diversité

La diversité est utilisée dans les systèmes de transmission sans fil pour combattre l'évanouissement à faible échelle causé par les multi-trajets. En effet, si plusieurs répliques de l'information sont reçues par des liaisons dont les évanouissements respectifs sont indépendants les uns des autres, il y a une très forte probabilité pour qu'au moins l'une de

ces liaisons ne subisse pas de forte atténuation, augmentant ainsi la fiabilité de la liaison. La diversité se révèle donc être un outil très puissant pour combattre les évanouissements et les interférences entre canaux de transmission, et permet notamment d'augmenter la capacité et la couverture des systèmes radios. Les trois formes de diversité traditionnellement exploitées en communication numérique sont la diversité temporelle, la diversité fréquentielle et la diversité spatiale.

3.8.1 Diversité temporelle

Elle se manifeste par la présence de canaux indépendants dans le temps. La diversité temporelle consiste à émettre plusieurs répliques du signal (ou des versions redondantes) dans des intervalles temporels séparés d'au moins le temps de cohérence du canal T_c (figure 3.10). Ce type de diversité est obtenu par codage de canal et entrelacement, ou encore par demande de répétition automatique. Le principal désavantage de ce procédé est bien sûr le retard induit par la diversité et la baisse de débit correspondante. Ce type de diversité peut être exploité dans le cas des canaux à évanouissement rapide [60].



FIGURE 3.10 – Le même signal est transmis sur plusieurs intervalles temporels.

Où :

- $S(t)$: est le signal transmis sur plusieurs intervalles temporels.
- T_c : est le temps de cohérence du canal.
- B_s : est la largeur de bande du signal.

3.8.2 Diversité fréquentielle

Ce type de diversité peut être obtenu lorsque le canal est sélectif en fréquence. Pour cela, l'émetteur envoie le même signal (des versions redondantes) sur plusieurs fréquences porteuses [13], dont l'écartement fréquentiel est d'au moins la bande de cohérence du canal B_c (figure 3.11). La diversité fréquentielle peut être exploitée par l'utilisation d'une modulation multi-porteuse conjointement avec un entrelaceur et un codage correcteur d'erreur. Les techniques d'étalement de spectre sont parfois considérées comme une source potentielle de diversité fréquentielle. Ces techniques utilisent une séquence pseudo-aléatoire pour élargir le spectre du signal, autorisant ainsi une bonne résistance aux perturbations et une grande discrétion de transmission. Elles ont d'ailleurs été initialement développées pour des applications militaires. L'étalement de spectre par séquence directe et l'étalement par sauts de fréquence sont les plus répandus [60].

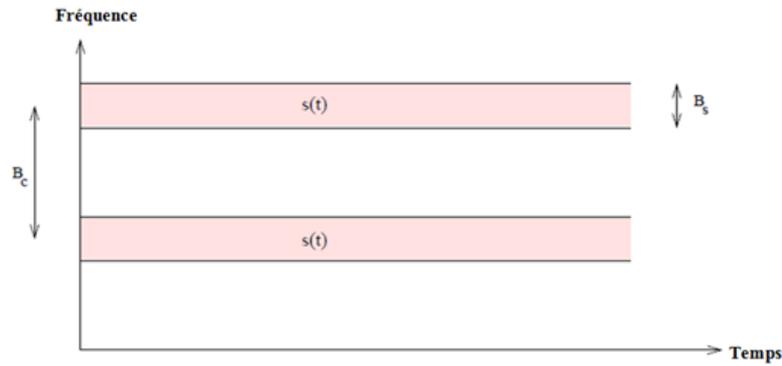


FIGURE 3.11 – Le même signal est transmis sur plusieurs intervalles fréquentiels.

Où :

- $S(t)$: est le signal transmis sur plusieurs intervalles fréquentiels.
- B_c : est la largeur de bande de cohérence du canal.
- B_s : est la largeur de bande du signal.

3.8.3 Diversité spatiale

Connue aussi sous le nom de diversité d'antennes, elle est créée par la présence de plusieurs antennes à l'émission et/ou à la réception. On parle de système multi-antennes ou système MIMO. La diversité spatiale consiste à émettre ou recevoir l'information par plusieurs antennes, qui doivent être espacées suffisamment pour que l'évanouissement sur chaque antenne soit indépendant (distance de cohérence) et dépend donc de l'angle de départ et/ou d'arrivée des multi-trajets. Cette distance de cohérence peut varier très largement selon le type et l'emplacement de l'antenne considérée. Des mesures empiriques ont montré une forte corrélation entre la hauteur de l'antenne d'une station de base et la distance de cohérence [60] [13].

3.9 Principales caractéristiques des systèmes multi-antennes

Les communications sur un canal sans-fil de type plat en fréquence ont une mauvaise performance en raison de la probabilité élevée que le trajet subisse un évanouissement profond. Si la destination reçoit plusieurs copies du signal transmis ayant subi chacune un évanouissement sur un trajet indépendant, la probabilité qu'il y ait au moins un trajet avec un faible évanouissement est élevée et l'information sera décodée correctement. Le principe de la diversité, vu précédemment, est donc l'une des caractéristiques les plus intéressantes des systèmes multi-antennes. Nous pouvons trouver d'autres caractéristiques telles que l'expression de la capacité et l'influence du milieu de propagation.

3.9.1 Expression de la capacité

Les systèmes mono-antenne (SISO pour Single Input Single Output) nécessitent plus d'énergie pour une transmission au même taux d'erreur binaire (TEB) que les systèmes utilisant des antennes multiples tant à l'émission qu'à la réception (MIMO) et permettent d'augmenter considérablement la capacité des canaux radio à évanouissements, par conséquent, pour le même rapport Signal sur Bruit les systèmes MIMO sont bien plus fiables que les systèmes SISO [77]. L'efficacité énergétique des transmissions MIMO est particulièrement utile pour les réseaux de capteurs sans fil. Cependant, l'application directe des techniques MIMO à ce contexte est difficile étant donnée la taille limitée des nœuds qui, a priori, ne peuvent supporter qu'une seule antenne. Heureusement la coopération entre capteurs est possible tant à l'émission qu'à la réception pour former un système MIMO coopératif.

3.9.2 Influence du milieu de propagation

La plupart des études, concernant les systèmes MIMO, considèrent des antennes parfaitement décorréelées, à la fois à l'émission et à la réception. Le cas corrélé considérant un trajet direct est étudié de façon géométrique dans [61]. Cette étude est approfondie dans [15] qui montrent que la corrélation affecte les capacités respectives des différents sous-canaux, et propose alors des bornes pour la capacité globale. L'influence de l'angle d'étalement (plus il diminue, plus la capacité décroît) et de la position géométrique des antennes y est également soulignée. Il serait en outre intéressant de se pencher sur les angles d'arrivée sur les antennes en appliquant aux systèmes MIMO des techniques de mesure déjà utilisées en transmission mono-antenne [79].

3.10 Applications envisagées

L'environnement intra-muros (urbain) est particulièrement favorable aux systèmes de communication multi-antennes puisqu'il engendre de nombreux échos et que les canaux de transmission varient très lentement dans le temps [68]. La première application connue des systèmes MIMO concerne les réseaux locaux sans fil. L'avènement des systèmes MIMO concerne aussi les réseaux fixes d'accès large bande. Le projet prévoyant une explosion des communications large bande lancé par les industriels nord-américains, il y a quelques années, en déployant une soixantaine de millions de kilomètres de fibre optique a généré des technologies parallèles comme l'ADSL (Asymmetric Digital SubscriberLine), ou les transmissions hertziennes. Malheureusement la première génération de systèmes n'était pas franchement fiable, puisque les antennes assurant les liaisons nécessitaient une "ligne de vue" et la couverture n'était généralement pas bonne. L'arrivée des systèmes multi-antennes dans la deuxième génération a révolutionné le marché en réduisant les coûts

d'exploitation tout en augmentant les débits et la couverture des réseaux. Les industriels espèrent beaucoup de la technologie multi-antennes, et pensent qu'elle peut régler divers problèmes de débit et de fiabilité. Mais les systèmes MIMO sont encore plus efficaces s'ils sont associés avec d'autres technologies, comme les multi-porteuses qui consistent à transmettre des données numériques en les modulant sur un grand nombre de porteuses en même temps ou encore l'accès multiple [60]. Ces avantages ont fait des systèmes MIMO un des domaines les plus attractifs pour les industriels, qui y voient une des technologies susceptibles de résoudre les problèmes d'encombrement et de limitation de capacité des réseaux de capteurs sans fil large bande.

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

Plusieurs travaux ont été proposés pour résoudre le problème de la consommation d'énergie. Nous allons dans ce qui suit présenter quelques stratégies MIMO coopératives dédiées aux réseaux de capteurs sans fil.

3.11.1 Energy efficient virtual MIMO-based cooperation communication in wireless sensor networks

Dans [59], les auteurs ont proposé une nouvelle architecture MIMO virtuelle basée sur une communication coopérative à basse consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

Les circuits complexes (émetteur / récepteur) des systèmes MIMO et une puissance de traitement des signaux importante, peuvent exiger une consommation d'énergie importante au niveau du circuit ce qui constitue un inconvénient majeur de ce type de système. Le système de communication et les paramètres de propagation du canal définissent

l'efficacité du système proposé. Les techniques MIMO virtuelles basées sur la coopération peuvent être employés pour économiser l'énergie.

Les hypothèses

Pour concevoir l'architecture MIMO virtuelle basée sur la coopération, les auteurs ont posé divers hypothèses, telles que l'évanouissement du signal qui doit être uniforme et les signaux traités qui doivent être en "bande étroite", c'est à dire que la fréquence de la porteuse de modulation est très supérieure à la bande utilisée pour la transmission. Pour moduler les évanouissements, dus aux multi-trajets incohérents lorsque l'émetteur et le récepteur ne sont pas en vue directe, Rayleigh fading plat (type de canal à évanouissement) est utilisé. Enfin, la technique MIMO utilisée est le schéma d'Alamouti ou le Codage Spatio-Temporel par Blocs qui lui donne sa généralisation avec plus de 2 antennes à l'émission.

Principe de la solution proposée

Le modèle proposé présente une communication coopérative entre un groupe de n_t nœuds de collecte de données ou DCN (Data collection node) et un collecteur de données ou DGN (Data Gathering Node) possédant plusieurs antennes qui peut agir comme un chef de file de capteurs ou d'un centre de fusion.

La nouvelle technique MIMO virtuelle proposée dans la figure 3.12, se résume comme suit :

- a) **Coté émetteur** : les nœuds qui possèdent des données à transmettre au DGN, commencent par diffuser leurs données sur une courte distance d_m à tous les autres nœuds du groupe (transmission locale). À la fin de cette étape, chaque nœud de collecte de données possède les données de tous les nœuds du groupe. La technique

MIMO (STBC) est alors employée pour envoyer simultanément les données au DGN sur une distance d , $d \gg d_m$ (transmission MIMO) où chaque nœud coopérant joue le rôle d'une antenne d'un système multi-antennaire.

b) Coté récepteur : à la réception, la DGN reçoit le signal MIMO modulé et s'occupe de la recombinaison des signaux. Les capteurs sont soumis à des contraintes strictes de consommation d'énergie alors que la DGN qui n'a pas de contrainte énergétique assurera le maximum de calculs (estimation du canal, codage, quantification, etc.) afin d'optimiser la consommation.

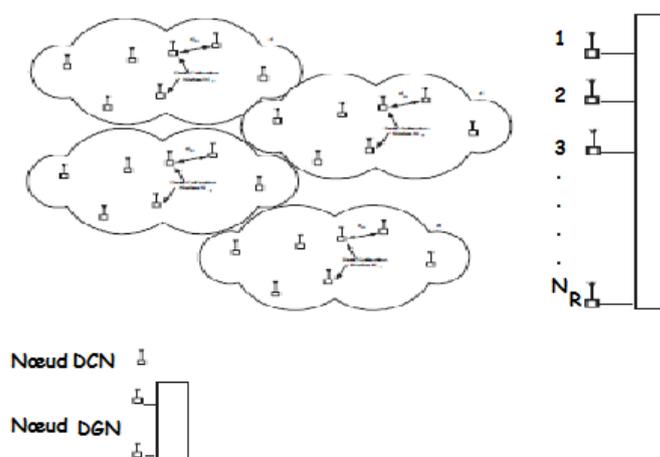


FIGURE 3.12 – Les communications MIMO virtuelles dans le réseau de capteurs sans fil.

L'énergie consommée par l'architecture MIMO virtuelle proposée est : l'énergie nécessaire à la communication locale des capteurs de collecte de données et l'énergie nécessaire pour les communications à longue distance à partir des nœuds de collecte (DCN) à la DGN. L'énergie totale nécessaire afin de communiquer les données à tous les nœuds est donnée par :

$$E^{MIMO} = \sum_{i=1}^{N_T} L_i \bar{E}_i^T + \bar{E}^l \sum_{n=1}^{N_R} L_i \quad (3.13)$$

Où :

- N_T : est le nombre de nœuds à l'émission.
- N_R : est le nombre de nœuds à la réception.
- \bar{E}_i^T : est l'énergie moyenne consommée par bit par chaque nœud capteur durant les communications locales.
- \bar{E}^l : est l'énergie moyenne consommée par bit durant les communications longue distance (entre deux clusters).
- L_i : est le nombre de bits à transmettre.

L'énergie totale consommée tout au long du trajet peut être divisée en deux composantes principales : Énergie consommée par les amplificateurs (P_{PA}) et l'énergie consommée par tous les blocs de circuits émetteur/récepteur (P_c). Pendant les communications locales d'un capteur i , pour $i = 1, \dots, N_T$, les autres ($N_T - 1$) nœuds capteurs agissent tous comme des récepteurs. Ainsi, l'énergie consommée dans ce cas consiste à celle de circuit émetteur et celle de ($N_T - 1$) circuits récepteurs :

$$P_{ic}^T = (PDAC + P_{mix} + P_{filtr} + P_{synth}) + (N_T - 1)(PLNA + P_{mix} + PIFA + P_{filtr} + ADC + P_{synth}) \quad (3.14)$$

Où :

- P_{ic}^T : énergie totale consommée par bit durant la transmission.
- $PDAC$: puissance du convertisseur analogique numérique.
- P_{mix} : puissance du mélangeur.
- P_{synth} : puissance du synthétiseur de fréquence.
- $PLNA$: puissance de l'amplificateur faible bruit.
- $PIFA$: puissance de l'amplificateur à fréquence intermédiaire.
- P_{filtr} : puissance du filtre actif à la réception.

- P_{ADC} : puissance du convertisseur analogique numérique.

Evaluation de performances

Les résultats de simulation ont montré que la stratégie MIMO proposée permet d'obtenir 50% d'économie en énergie par rapport à un système SISO pour les grandes distances. Les performances du système MIMO virtuel sont moins bonnes que celle d'un système SISO pour des distances très courtes.

Discussion et critiques

L'énergie consommée dans les blocs de traitement des signaux en bande de base est omise, les résultats obtenus ne sont donc pas très réaliste. De plus la distribution des nœuds capteurs dans le terrain est aléatoire, alors que de meilleures performances peuvent être obtenues si le système est conçu de façon judicieuse en prenant en considération les exigences en termes de distance de transmission. En outre, il est possible de concevoir avec soin un réseau de capteurs de sorte à ce que l'architecture du réseau virtuelle basée sur des communications MIMO puisse apporter une amélioration significative pour des délais moins lents.

3.11.2 Uniform Energy Consumption through Adaptive Optimal Selection of Cooperative MIMO Schemes in Wireless Sensor Networks

Dans [2], les auteurs proposent une solution pour le problème de consommation d'énergie non uniforme en proposant un système MIMO coopératif basé sur une sélection adaptative de nœud de coopération. Dans les situations où la sélection optimale des nœuds de coopération devient impossible. La solution proposée utilise la taille de constellation et la vitesse de transmission plutôt que d'autres paramètres de contrôle dans les situations

où la sélection optimale des nœuds coopératifs devient impossible, cela pour une consommation minimale d'énergie. En utilisant une transmission MIMO coopérative au lieu que d'utiliser un système SISO, les auteurs ont démontré que la charge adaptative basée sur la sélection de nœuds de coopération dans les clusters rend la consommation d'énergie uniforme dans le réseau de capteurs.

Les hypothèses

Les auteurs supposent que les nœuds capteurs sont parfaitement synchronisés. Ils posent également l'hypothèse d'une parfaite estimation du canal et un maximum de vraisemblance dans la détection du récepteur.

Principe de la solution proposée

- a) **Coté émetteur** : pour la transmission des données d'un nœud source S vers un nœud destinataire D sur une distance d , au lieu d'une transmission directe SISO qui n'est pas pratique pour de longue distance, le nœud S peut coopérer avec ses voisins et échanger ses données (la distance entre les nœuds coopérant $d_c \ll d$). Quand un ou plusieurs nœuds capteurs veulent envoyer des données captées, ils les envoient au cluster-head (CH). Ensuite, le CH les transmet vers la station de base en utilisant un routage multi-sauts. Les clusters voisins ainsi que les clusters dans le chemin du routage envoient également leurs données, ainsi la charge du réseau augmente progressivement en se rapprochant de la station de base.
- b) **Coté récepteur** : les nœuds coopératifs voisins de la destination D reçoivent les symboles modulés et les retransmettent respectivement au nœud de destination D . Chaque cluster est en mesure de contrôler sa consommation totale d'énergie. La transmission coopérative permet ainsi de réduire l'énergie consommée par bit en

augmentant le nombre de nœuds coopératifs de transmission et de réception pour une performance du taux d'erreurs par bits (BER) requis.

Energie consommée

a) **Énergie totale consommée par cluster " j " :** il existe deux principales causes de consommation d'énergie dans un cluster : consommation d'énergie lors de la transmission des données vers le cluster voisin (prochain saut) et la consommation d'énergie pendant la réception de données envoyées par le cluster voisin.

La quantité de données dans un cluster j (Q_j) est :

$$Q_j = \sum_{k=1}^N l_i + \{ \text{Données captées dans le cluster } j \} \times FF \quad (3.15)$$

Où :

- l_i : sont les données détectées dans le cluster " i ".
- FF : est le facteur de fusion.
- j : est le cluster " j " qui dispose de N données à transmettre aux autres clusters.
- N : est le nombre de clusters voisins.

b) **Énergie totale consommée lors de la transmission coopérative :** la figure 3.13 montre un modèle de consommation d'énergie par un cluster utilisant des communications coopératives pour la transmission / réception de données.

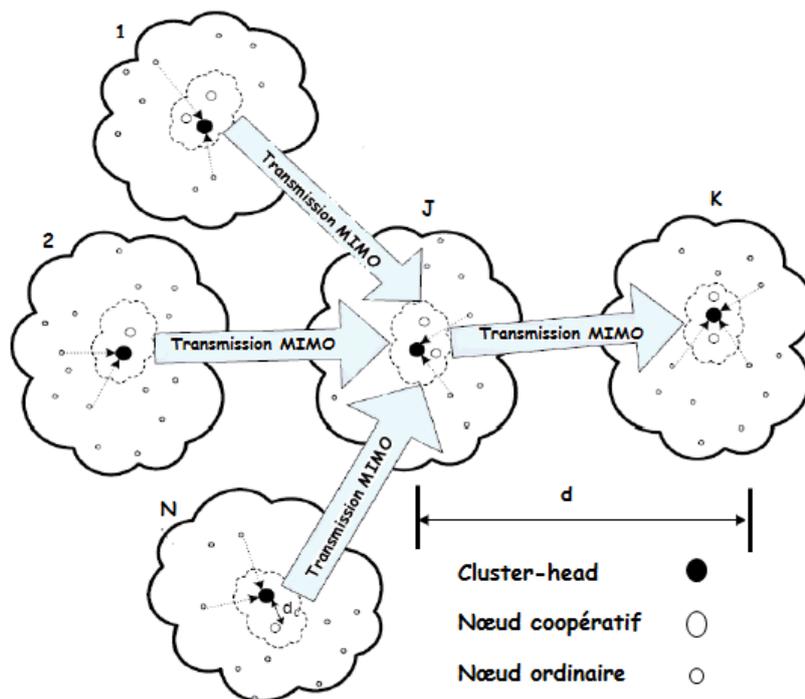


FIGURE 3.13 – Modèle de consommation d'énergie du cluster j.

L'énergie totale consommée durant la transmission coopérative est :

$$E_{trans-coop-total} = E_{trans-coop} + E_{trans-OH-trans} + E_{trans-OH-rcv} \quad (3.16)$$

Où :

- $E_{trans-coop-total}$: est l'énergie totale consommée durant la transmission coopérative.
- $E_{trans-coop}$: est l'énergie de transmission coopérative inter-cluster.
- $E_{trans-OH-trans}$: est l'énergie consommée lors de l'envoi de données du CH à tous les nœuds coopératifs.
- $E_{trans-OH-rcv}$: est l'énergie consommée à la réception de données par $(N_T - 1)$ nœuds coopératifs.

Résultats de simulation

Le scénario de simulation adopté est montré dans la Figure 3.14 :

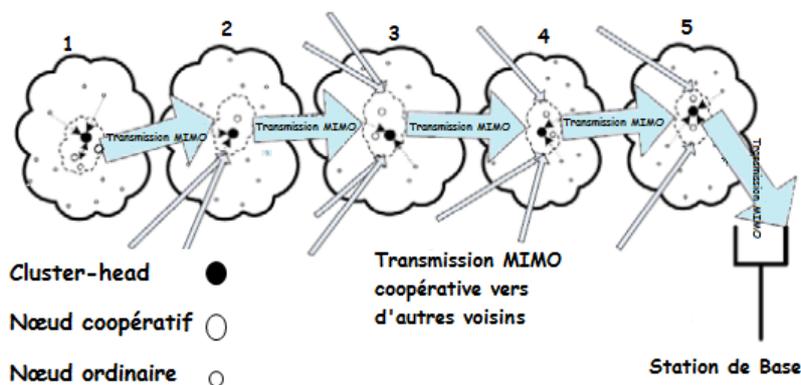


FIGURE 3.14 – Scénario de la simulation.

Les résultats de simulation montrent qu'il n'y a qu'une légère différence entre l'énergie consommée par les clusters de bord (cluster 1 dans la figure 3.14) et les clusters à proximité de la station de base (cluster 5 dans la figure 3.14), alors qu'en absence d'un contrôle de l'énergie totale consommée par chaque cluster, les résultats montrent qu'à proximité de la station de base, la charge est environ 15 fois plus importante que celle estimée dans le cluster de bord. Il est à noter que le cluster de bord porte uniquement ses propres données détectées alors que le cluster à proximité de la station de base supporte la charge des données des clusters voisins, en plus de ses propres données détectées.

Discussion et Critiques

Les auteurs se sont basés dans la solution proposée sur le point essentiel (la stratégie MIMO coopérative) pour palier au problème de consommation d'énergie non uniforme en proposant un système MIMO coopératif basé sur une sélection adaptative de nœuds de coopération. De plus la sélection de nœuds de coopération en fonction de la charge adaptative dans les clusters rend la consommation d'énergie uniforme dans le réseau. Néanmoins, afin d'obtenir des résultats plus réalistes il serait préférable de considérer les

données captées par les clusters de passage comme des variables aléatoires.

En absence d'un contrôle de l'énergie totale consommée par chaque cluster, les clusters à proximité de la station de base sont des points chauds puisque ils supportent la charge des données des clusters voisins, en plus de ces propres données détectées donc ils consomment plus d'énergie que les autres clusters dans le réseau.

3.11.3 Cooperative node selection for virtual MIMO in wireless sensor networks

Dans [23], les auteurs ont proposé une technique de coopération pour la minimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. La technique proposée sélectionne des nœuds de coopération dans un réseau en utilisant plusieurs critères, et les données sont transmises en utilisant un routage multi-sauts. La puissance d'émission est réduite considérablement grâce à des communications multi-sauts. Ainsi, la performance globale est renforcée grâce à la technique proposée. Les transmissions inutiles des nœuds non coopératifs sont évitées, ce qui augmente considérablement l'efficacité énergétique. L'algorithme proposé offre également de bonnes performances en termes de taux d'erreurs par bit.

Principe de la solution proposée

Le modèle proposé par les auteurs, pour la communication entre deux nœuds, est montré dans la figure 3.15. Les nœuds récoltent les données de l'environnement surveillé et les transmettent à leur cluster-head. Ce dernier sélectionne les nœuds de coopération, dans son cluster, et leur transmet les données. Tous les nœuds du cluster émetteur collaborent pour une transmission des données inter-cluster au cluster-head du cluster récepteur, le processus ce répète jusqu'à ce que la destination soit atteinte. Le placement aléatoire de nœuds est considéré parce qu'en pratique le déploiement des réseaux de capteurs est

aléatoire dans la plupart du temps. La formation des clusters est effectuée en utilisant le carré de la distance entre les nœuds présents dans le réseau. Le cluster-head est défini grâce à un quelconque protocole de sélection de cluster-head. Les nœuds du réseau rejoignent le cluster-head le plus proche et aussi les clusters sont formés. Grâce à la sélection de nœuds coopératifs, la durée de vie du réseau peut être améliorée de façon remarquable.

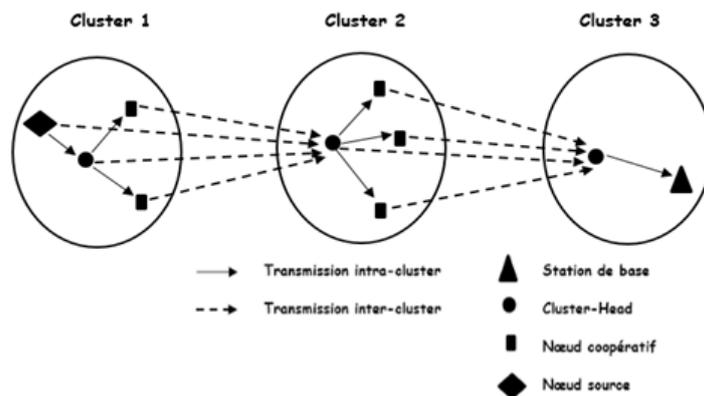


FIGURE 3.15 – Architecture du modèle.

La connaissance de la position des capteurs est l'une des caractéristiques essentielles pour le fonctionnement de cet algorithme. Pour cela, les deux critères à savoir la distance et le rapport signal sur bruit (SNR), sont pris en compte.

La distance entre les nœuds du cluster et leur cluster-head est calculée comme suit :

$$d = \sqrt{(N_{ch}(x_i) - N(x_i))^2 + (N_{ch}(y_i) - N(y_i))^2} \quad (3.17)$$

Où :

- $(N_{ch}(x_i), N_{ch}(y_i))$: les coordonnées du CH sur un plan 2D
- $(N(x_i), N(y_i))$: les coordonnées du ième nœud sur un plan 2D.

Une distance seuil est également fixée pour la comparaison. Celle-ci est calculée comme suit :

$$d_0 = 4\pi h_t h_r \quad (3.18)$$

Où :

- h_t : est la hauteur de l'antenne d'émission.
- h_r : est la hauteur de l'antenne de réception.

Ainsi, la distance qui sépare le cluster-head de chaque nœud est comparée à la distance seuil. Si la distance calculée est inférieure à la distance de seuil, le nœud peut donc être sélectionné comme nœud coopératif s'il satisfait également un deuxième critère, à savoir, la moyenne du rapport signal sur bruit (SNR_{th}). Ce dernier est déterminé comme suit :

$$SNR_{th} = \sum SNR_i \quad (3.19)$$

Où :

- i : est le nombre de nœuds dans le cluster.

En effet, le rapport signal sur bruit (SNR) de tous les nœuds du réseau sera calculé ainsi que la moyenne du rapport signal sur bruit (SNR_{th}). Les deux paramètres seront comparés. Si le SNR d'un nœud est supérieure à la moyenne (SNR_{th}), le nœud sera pris en compte pour être éventuellement un nœud coopératif si le premier critère est bien évidemment satisfait. Choisir les nœuds avec un rapport signal sur bruit important permet de choisir les voisins considérés comme très proches du CH. Après l'élection des nœuds de coopération pour chaque cluster, chaque cluster-head transmet les données à ses nœuds coopératifs (NC). Ensuite, le CH et le NC transmettent les données au CH du cluster suivant.

Evaluation de performances

Les résultats de simulation montrent que le taux d'erreurs par bits (BER) et la dissipation d'énergie sont réduits grâce à la transmission multi-sauts. La durée de vie du réseau

est renforcée grâce à la sélection de nœuds coopératifs. Afin d'améliorer le rapport signal sur bruit, la formations de clusters dans les réseaux de capteurs sans fil semble nécessaire.

Discussion et critiques

Les nœuds élus comme des cluster-heads sont des points chauds vu qu'ils consomment plus d'énergie que les autres nœuds dans le réseau. De plus les cluster-heads ne changent pas régulièrement, donc le réseau va être partitionné, c'est à dire le découpage du réseau en secteurs.

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

Dans [80], les auteurs analysent les performances du canal MIMO virtuel dans le cas des transmissions multi-sauts dans les réseaux de capteurs sans fil. Les auteurs proposent une topologie réseau en clusters avec des nœuds capteurs regroupés en un ensemble collaboratif. Par la suite, les nœuds appartenant à un cluster donné transmettent et reçoivent des données d'autres clusters d'une façon coopérative, exploitant les avantages de la diversité des canaux MIMO virtuels cluster-à-cluster. Afin de construire la transmission coopérative, les auteurs organisent chaque saut en deux intervalles de temps consécutifs : le slot intra-cluster, qui représente le partage des données au sein du cluster et le slot inter-cluster pour la transmission entre les clusters. Les auteurs élaborent un protocole coopératif de réception, au sein des clusters, basé sur un algorithme simplifié qui est à son tour basé sur la diversité de sélection.

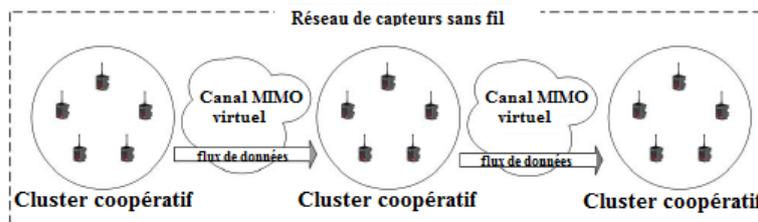


FIGURE 3.16 – Clusters coopératifs dans un réseau de capteurs sans fil multi-sauts.

Hypothèses

Chaque nœud appartenant à un cluster possède un CSI (information sur l'état du canal) à jour et parfait, par contre l'état du canal entre les nœuds de deux clusters indépendants n'est pas connu et tous les nœuds capteurs fonctionnent en mode half-duplex (à tour de rôle et jamais en même temps).

Principe de la solution proposée

a) **Coté émetteur** : les auteurs supposent qu'un cluster émetteur (TxC) est composé d'un ensemble de nœuds capteurs de coopération N_T , communiquant avec un cluster récepteur (RxC) composé d'un ensemble de N_R nœuds capteurs coopératifs. Afin de transmettre les données au cluster voisin, le (TxC) implémente deux fonctions :

1. Diffusion de données au sein du cluster, de sorte que tous les nœuds actifs puissent décoder les données à transmettre au cours de la transmission MIMO (l'ensemble des nœuds actifs n_t est un sous-ensemble de l'ensemble des nœuds émetteurs N_T du cluster (TxC)).
2. La transmission des données via un canal MIMO ($n_t \times N_R$). En raison des limitations des communications half-duplex, les deux fonctionnalités sont effectuées dans deux canaux orthogonaux, supposés comme des temps de division (TD) des canaux. Ces deux canaux sont appelés lors de la transmission de don-

nées (le canal intra-cluster (ITA) lors de la diffusion de données dans le même cluster et le canal inter-cluster (ITE), lors de la transmission de données entre deux clusters différents via un canal MIMO). Ainsi, les auteurs disposent de deux time-slots consécutifs ITA et ITE pour une transmission de données d'un cluster à un autre cluster :

✂ **Canal intra-cluster (ITA)** : au cours de cet intervalle de temps, les données à transmettre sont diffusées au sein du cluster de puissance P_1 durant un temps α . L'ensemble des nœuds se trouvant dans la portée de transmission de la source d'émission décode les données et coopère dans l'intervalle de temps ITE (appelé encore ensemble de décodage). Naturellement, le nombre de nœuds appartenant à l'ensemble de décodage dépend de α et P_1 .

✂ **Canal inter-cluster (ITE)** : dans cet intervalle de temps, le sous-ensemble n_t (nœuds constitués de la source de l'émission ainsi que l'ensemble de décodage) transmet conjointement des données, avec une puissance P_2 pendant un temps $(1 - \alpha)$, au (RxC) en utilisant un canal MIMO ($n_t \times N_R$) virtuel. Les auteurs supposent qu'il n'y a aucune connaissance du canal inter-cluster, et aucune synchronisation de symboles entre les nœuds du cluster. Le système de transmission proposé est basé sur des codes spatio-temporels distribués (STBC) avec une puissance de transmission de chaque nœud actif égale à $\frac{P_2}{n_t}$.

b) Coté récepteur : pendant l'intervalle de temps $(1 - \alpha)$ d'ITE, le cluster récepteur (RxC) reçoit les données via le canal MIMO ($n_t \times N_r$), et dans le but d'obtenir une pleine diversité de réception, il met en œuvre un algorithme de décodage multi-antennes. Etant donné la nature distribuée des antennes multiples de réception, les auteurs proposent un algorithme de réception simplifiée basée sur la diversité de

sélection (DS) dans l'ensemble des N_r canaux MISO arrivant à (RxC). En d'autres termes, le nœud capteur de cluster récepteur (RxC) avec le rapport signal sur bruit le plus élevé (SNR) agit en tant que coordinateur de cluster et décode les données. Par conséquent la consommation d'énergie dans la transmission cluster à cluster est limitée à E_t , ainsi :

$$E_t = \alpha P_1 + (1 - \alpha) P_2 \quad (3.20)$$

La qualité de transmission peut être optimisée à partir d'un choix judicieux des trois termes P_1, P_2 et α .

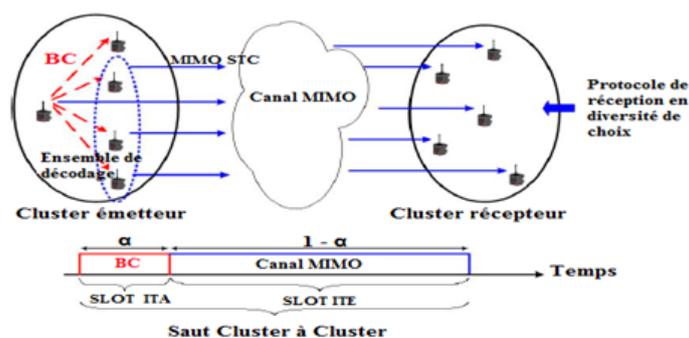


FIGURE 3.17 – Le schéma de transmission cluster à cluster.

Où :

- BC : est l'intervalle de temps ITA.
- STC : est le code spatio-temporel.

Modèle de signal et probabilité d'interruption

Parmi les problèmes rencontrés, lors des deux phases de communication (la transmission et la réception) est l'interruption du signal. Cependant, à partir des probabilités d'interruption optimisé entre cluster m et $(m + 1)$, la probabilité d'interruption totale de $(M - 1)$ sauts est évaluée comme suit :

$$P_{OUT} = 1 - \prod_{m=1}^{M-1} (1 - P_{out}^m) \quad (3.21)$$

Où :

- P_{out}^m : est la probabilité d'interruption minimale entre les deux clusters m et $(m+1)$.

Evaluation de performances

Des clusters sont définis comme des cercles de rayon R_{ITA} , la distance entre le centre de deux clusters consécutifs est $d_{ITE} = 1m$. Une répartition aléatoire des nœuds dans un cluster est faite suivant la loi de distribution uniforme. Le taux de perte de trajet (l'exposant de perte de trajet) est fixé à $\delta = 2$. Les auteurs supposent un cluster émetteur avec $N_1 = 3$ nœuds coopérants et d'un cluster récepteur avec $N_2 = 3$ nœuds coopérants. La simulation confirme que la stratégie MIMO coopérative proposée réalise la diversité spatiale du système ($N_1 \times N_2$) ; il y a une perte constante SNR entre un système MIMO réel et virtuel qui est justifiée par la fraction de l'énergie (puissance) utilisée pour diffuser des données durant un slot ITA. L'Analyse numérique montre un avantage de l'approche MIMO distribuée par rapport au système non coopératif multi-sauts en termes d'énergie. De plus, lorsqu'on augmente le nombre de sauts (c'est à dire lorsqu'on diminue la capacité d'interruption) l'économie d'énergie augmente également d'une manière très significative.

Discussion et critiques

Les performances du système MIMO virtuel se dégradent lorsque l'on augmente le rayon du cluster R_{ITA} . De plus fixer une distance entre le centre de deux clusters consécutifs représente une hypothèse forte qui n'est pas souvent réaliste.

3.11.5 Optimal Design of Virtual MIMO for WSN Performance Improvement

Dans [38], les auteurs ont étudié les performances d'une architecture MIMO virtuelle par rapport au taux d'erreur binaire (BER). Un schéma de puissance de transmission (PT) optimal pour des nœuds capteurs coopératifs a été présenté. Plus précisément, en minimisant le BER du système MIMO ($N_T \times 1$) virtuel, les auteurs considèrent que l'ajustement de la puissance optimale, pour chaque transmission coopérative d'un nœud capteur dans un cluster, est nécessaire pour maximiser les performances du système. Pour rendre le système MIMO virtuel efficace en énergie, il est nécessaire de diminuer la probabilité d'erreur, qui est le moyen de réduire les temps de retransmission lorsque les nœuds capteurs fonctionnent avec un niveau bas de puissance de transmission.

Hypothèses

Les auteurs modélisent la liaison sans fil entre deux nœuds quelconques dans le réseau comme un canal à évanouissement de Nakagami-m [1] à bande étroite. Tel que m est le facteur d'évanouissement de Nakagami. Les auteurs supposent que le canal s'évanouit pour différents liens, il est statistiquement indépendant et identiquement distribué. Le relais est généralement spatialement bien séparé (voir figure 3.18) et la puissance du bruit additif sur tous les terminaux récepteurs est modélisé comme bruit gaussien de moyenne nulle de variables aléatoires complexes et de variance 1. Pour rendre l'accès simple au médium, les auteurs supposent que les nœuds de relais transmettent sur des canaux orthogonaux, ainsi aucune interférence entre les relais n'est prise en compte dans le modèle du signal. Par conséquent la consommation d'énergie par bit peut être donnée comme suit :

$$E_{bit} = \frac{(P_{Pa} + P_c)}{R_b} \quad (3.22)$$

Où :

- P_{Pa} : est l'énergie consommée par l'amplificateur.
- P_c : est l'énergie totale consommée par blocs de circuits (émetteur / récepteur).
- R_b : est le débit binaire du système.

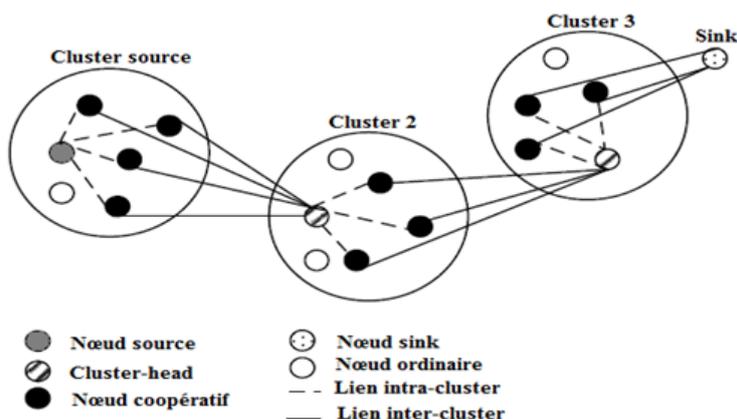


FIGURE 3.18 – Cluster basé sur un schéma MIMO virtuel pour le RCSF.

Principe de la solution proposée

- a) **Coté émetteur** : quand un nœud possède des informations à transmettre, il coopère avec les nœuds voisins dotés d'une seule antenne pour transmettre ses informations à une destination donnée, qui forme une rangée d'antennes virtuelles. Ainsi, les nœuds voisins qui participent à la coopération agissent comme des canaux de relais pour le nœud source.
- b) **Coté récepteur** : lorsqu'un nœud source envoie une information et qu'elle est captée par des nœuds coopératifs du cluster source, ces derniers créent un paquet contenant l'information de mesure pour la faire parvenir au cluster-head (CH) du cluster voisin, le CH du cluster voisin reçoit les informations envoyées par les nœuds coopératifs du cluster source. Le CH du cluster voisin, à son tour, diffuse les Nb bits d'information reçu aux nœuds coopérant par des liens intra-cluster (transmission

locale). Ainsi, les nœuds de coopération vont retransmettre les N_b bits au CH du cluster suivant par une liaison inter-cluster (transmission cluster à cluster) et ainsi de suite jusqu'à atteindre le nœud destinataire D .

Evaluation de performance

Les résultats de simulation montrent que l'utilisation d'une puissance de transmission (PT) optimale, pour chaque nœud participant à la coopération, améliore la fiabilité de communication inter-clusters. En effet, un réseau ayant une PT optimale pour chacun de ses nœuds coopératifs, ce qui permet de minimiser le BER, est plus performant qu'un réseau ayant les mêmes puissances de transmission pour tous ces nœuds coopératifs. Cette stratégie réduit la consommation d'énergie de sorte qu'un réseau de capteurs de ressource fortement limitée peut réaliser une plus longue durée de vie du réseau.

Discussion et critiques

Nous avons vu précédemment que la phase la plus consommatrice en énergie est bien celle de la transmission. Cependant, nous pouvons constater un grand nombre de communications dans le système proposé que ça soit des communications intra-cluster ou inter-cluster, remédier à ce problème fera augmenter d'avantage les performances déjà établis.

3.11.6 The Energy Efficient Cooperative MIMO Technique for Hierarchical Clustering Protocol

Diverses recherches ont été faites au niveau des différentes couches de communication pour réduire la consommation d'énergie d'un capteur pendant la communication des données captées, pour améliorer la durée de vie du réseau. La clusterisation est l'une des méthodes permettant de réduire la consommation d'énergie de chaque nœud déployé

dans le réseau. LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) l'un des protocoles de routage le plus populaire dédié aux RCSFs qui permet d'allonger la durée de vie du réseau. Avec l'avènement de la technique MIMO, il a été prouvé que l'utilisation de plusieurs antennes en émission et en réception aidera à créer moins de distorsion dans le signal. Le système MIMO a été mis en application avec succès dans les réseaux cellulaires. Afin de tirer profit des avantages des deux techniques citées auparavant (clusterisation et stratégie MIMO), les auteurs de [41], proposent d'appliquer la technique MIMO coopérative sur le protocole de routage hiérarchique LEACH. L'objectif principal étant de prolonger la durée de vie du réseau tout en assurant le bon acheminement des paquets vers la station de base.

Principe de la solution proposée

L'idée est de former des clusters en se basant sur la puissance du signal reçu et d'utiliser le cluster-head (CH) local comme routeur vers la station de base (SB). Cela permet d'économiser l'énergie puisque seuls les CHs et les nœuds coopératifs effectueront des transmissions de données vers la station de base. Le CH sélectionne également ses nœuds coopératifs en se basant sur la puissance du signal reçu. Le nœud le plus proche transmettra le signal avec une puissance plus élevée.

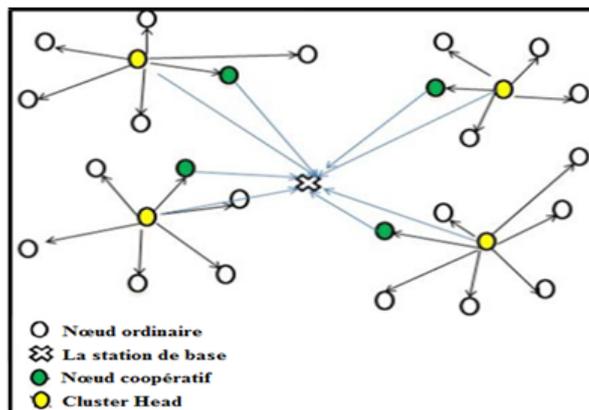


FIGURE 3.19 – Transmission de données vers la station de base.

Dans la figure 3.19, les nœuds en vert sont les nœuds coopératifs qui transmettent, ainsi que leur CH, des données à la station de base. Il y a une possibilité où le CH choisisse plus d'un nœud coopératif pour former d'autres systèmes de transmission de données (MIMO, MISO).

La consommation d'énergie dans une communication MISO ou SISO

En supposant que le nombre de saut vers la station de base soit égale pour les deux communications MISO et SISO, l'énergie totale consommée par bit est formulée pour les systèmes MISO et SISO proposés comme suit :

$$E_{bit} = (1 + \alpha) \frac{M_t N_0}{(P_b) \frac{1}{M_t}} \times \frac{(4\pi d)^2}{G_t G_r \lambda^2} M_t N_f + \frac{P_c}{R_b} \quad (3.23)$$

Où :

- E_{bit} : est l'énergie consommée dans une communication MISO ou SISO.
- M_t : représente la bande de liaison qui compense la variation du bruit et l'interférence du processus matériel.
- N_f : est le facteur du bruit à la réception.
- M_t : est le nombre d'antennes de transmission.

- P_c : est la consommation du bloc de circuit.
- R_b : est le débit binaire.
- d : représente la distance de transmission.
- P_b : représente le taux d'erreur moyen.
- N_0 : est la densité spectrale de la puissance du bruit thermique.
- G_t : représente le gain des antennes de transmission.
- G_r : représente le gain des antennes de réception.
- λ : est un coefficient qui dépend de nombre d'antennes émettrices et réceptrices.

Evaluation de performances

Les résultats de simulation montrent que les transmissions MIMO sont plus efficaces que les transmissions SISO dans un canal à évanouissement de Rayleigh mais ceci pourrait être contradictoire si en considère l'énergie consommée par le circuit. Les résultats montrent également que, pour la communication courte portée, la technique SISO est plus efficace que la technique MIMO. Mais au fur et à mesure que la portée de communication augmente le système MIMO devient plus efficace.

Discussion et critiques

La mise en œuvre de l'algorithme de sélection des nœuds coopératifs offre des gains remarquables en termes d'efficacité énergétique, certes, mais LEACH utilise un routage à saut unique où seul les CHs et les nœuds coopératifs effectueront des transmissions vers la station de base comme le montre la figure 3.19. Mais le routage à un seul saut des cluster-heads présente un inconvénient très pénalisant de LEACH, parce que dans les protocoles de routage hiérarchiques qui se basent sur ce type de routage, les CHs et les nœuds coopératifs s'épuisent rapidement car ils peuvent être loin de la station de base.

Par ailleurs, la solution proposée n'est pas applicable aux réseaux qui sont déployés sur une grande surface. La taille de constellation n'est pas considérée lors de l'estimation de l'énergie consommée dans la solution proposée, d'autant plus qu'elle aide à réduire au maximum la consommation d'énergie du réseau.

3.11.7 A Joint Energy-balanced Organizing Scheme with Hexagon-Clustered Algorithm and Cooperative MIMO for WSNs

L'efficacité énergétique et l'équilibrage de charge sont deux facteurs importants pour prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil.

Dans [66], les auteurs proposent un des protocoles permettant d'équilibrer la consommation d'énergie des nœuds dans les RCSFs. La solution proposée combine le protocole EB-LEACH (améliorée de LEACH) et la stratégie MIMO coopérative. Le protocole est appelé EB-LEACH-MIMO.

Principe de la solution proposée

Le modèle du réseau proposé est montré dans la figure 3.20, la station de base est loin du secteur de surveillance. N nœuds capteurs répartis suivant une distribution aléatoire uniforme sur un espace $(M \times M)m^2$. Le réseau est divisé en k clusters hexagonaux pour éviter l'irrégularité de la distribution des cluster-heads. Chaque cluster est donc composé d'un cluster-head et de nœuds ordinaires. Quelques nœuds ordinaires sont également choisis en tant que nœuds coopératifs pour une transmission MIMO coopérative.

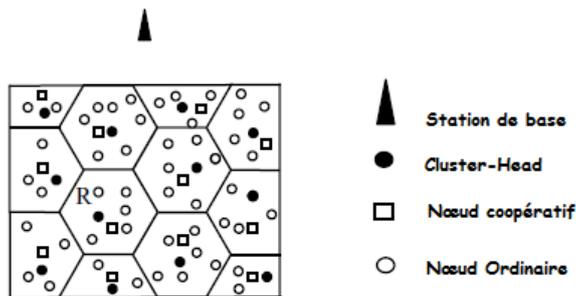


FIGURE 3.20 – Déploiement du réseau selon le modèle proposé.

Au premier lieu, la station de base diffuse un paquet pour déclencher tous les nœuds dans le réseau et reçoit de chaque nœud un paquet de données qui inclut principalement l'identification, l'endroit et l'énergie résiduelle du nœud. Puis la station de base calcule le nombre optimal de clusters K_{opt} et partitionne la région du réseau en K_{opt} hexagones, elle informe par la suite les nœuds pour rejoindre le cluster hexagonal le plus proche. La partition hexagonale est faite seulement une fois pendant la vie du réseau. Dans le système proposé, tous les cluster-heads sont choisis par la station de base dans la première phase. Dans les phases suivantes, pour éviter la transmission de longue distance entre la station de base et les nœuds qui est coûteuse en énergie, le nouveau cluster-head d'un cluster est choisi par le cluster-head de la phase précédente. Pour être un cluster-head le nœud candidat doit posséder les deux critères suivants :

- Son énergie résiduelle doit être plus grande que l'énergie seuil; celle-ci peut être définie pour être la moyenne de l'énergie résiduelle de tous les nœuds vivants dans le cluster.
- Sa position doit être, autant que possible, près du centre du cluster.

La stratégie d'élection d'un cluster-head peut être exprimée comme suit :

$$\min_{n_{\text{noeud}} \in \text{cluster}} d(i), \quad \text{telque} \quad E_{\text{res}}(i) > E_{\text{th_ch}} \quad (3.24)$$

Où :

- $E_{res}(i)$: est l'énergie résiduelle.
- $d(i)$: est la distance entre le nœud candidat i et le centre du cluster.
- E_{th_ch} : est l'énergie seuil, qui peut être définie comme l'énergie résiduelle moyenne de tous les nœuds vivants dans le cluster.

Dès lors que le cluster-head possède les informations sur l'état d'énergie et l'endroit de chaque nœud dans le cluster pendant la phase de clusterisation, il est responsable du choix des nœuds coopératifs selon la stratégie suivante :

$$\max_{noeud_i \in cluster} \frac{E_{res}(i)}{D^2(i)} \quad \text{telque} \quad d_{min} \leq D(i) \leq d_{max} \quad \text{et} \quad E_{res}(i) > E_{th_ch} \quad (3.25)$$

Où :

- $D(i)$: est la distance entre le cluster-head et le nœud ordinaire i dans le cluster.
- d_{min}, d_{max} : sont la longueur d'onde de la porteuse et la synchronisation requise respectivement.

Après les phases ci-dessus, le cluster-head diffuse un message pour informer les nœuds coopératifs choisis de leurs rôles dans la transmission coopérative, puis, il crée et diffuse le programme TDMA (Time Division Multiple Access), qui inclut des times slots pour la transmission de données. Les nœuds ordinaires transmettent les paquets de données au cluster-head dans leur propre time slot TDMA alternativement et s'endorment pendant le reste du temps. Après que les paquets de données soient reçus et agrégés, le cluster-head diffuse les données agrégées à ses nœuds coopératifs. Enfin, les capteurs coopératifs et le cluster-head envoient coopérativement les données à la station de base.

Consommation d'énergie du modèle proposé

Pour la transmission MIMO coopérative, les auteurs supposent que la distance entre l'émetteur et le récepteur est d et l'énergie de dissipation pour transmettre et recevoir des l bits est dénoter $E_{MIMO_Tx}(l, d)$, $E_{MIMO_Rx}(l)$ respectivement. Nous avons :

$$E_{MIMO_Tx}(l, d) = M_t l E_{Tx_elec} + \varepsilon_{M_t} l d^4 \quad (3.26)$$

$$E_{MIMO_Rx}(l) = M_t l E_{Rx_elec} \quad (3.27)$$

Où :

- E_{Tx_elec} : est la consommation d'énergie par bit du circuit émetteur.
- E_{Rx_elec} : est la consommation d'énergie par bit du circuit du récepteur.
- M_t : est le nombre de nœuds coopératifs.
- ε_{M_t} : est un coefficient qui dépend du nombre d'antennes émettrices, du taux d'erreurs, de l'effet de l'amplificateur d'antenne et la porteuse de fréquence.

Dans le réseau, l'énergie est principalement consommée dans :

- La transmission de données des nœuds ordinaires au cluster-head, du cluster-head aux nœuds coopératifs et du cluster-head et des nœuds coopératifs a la station de base.
- Des opérations de circuit correspondant à la transmission de données ci-dessus.
- L'agrégation de données par les cluster-heads.

Evaluation de performances

Pour prouver le gain énergétique de la solution proposée, les protocoles EB-LEACH, LEACH-MIMO et LEACH sont pris comme références. LEACH-MIMO est une combinaison simple de LEACH et la technique MIMO. EB-LEACH est un protocole amélioré

de LEACH. Les résultats de simulation montrent que la durée de vie du réseau pour le protocole EB-LEACH-MIMO est la plus longue. Son avantage est de 8%, 76% et 87% plus que EB-LEACH, LEACH-MIMO et LEACH respectivement. Cette amélioration significative provient de la cloison hexagonale de réseau qui contribue à l'équilibrage de l'énergie consommé entre les clusters et la génération des cluster-heads en tenant compte de leurs positions et de leurs énergies résiduelles. EB-LEACH-MIMO peut bien équilibrer la charge de réseau, économiser de l'énergie et prolonger la durée de vie du réseau.

Discussion et critiques

La solution proposée peut ne pas être efficace dans la mesure où le CH et le nœud coopératif sont supposés avoir une large portée de communication afin que les données puissent atteindre la station de base en un seul saut. Ceci n'est pas toujours une hypothèse réaliste, LEACH utilise un réseau homogène, les cluster-heads et les nœuds coopératifs sont donc des capteurs ordinaires et la station de base n'est souvent pas directement accessible.

3.11.8 Energy efficiency of virtual MIMO transmission schemes for cluster-based wireless sensor networks

Dans [12], les auteurs proposent une architecture de transmission MIMO virtuelle basée sur le clusterisation et ce pour réduire la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie du réseau. Dans cette architecture, au lieu d'employer des nœuds du cluster en tant que nœuds coopératifs, les cluster-heads coopèrent pour former une rangée d'antennes virtuelle de sorte que la technique MIMO puisse être mis en application. Des techniques MIMO basées sur V-BLAST et STBC sont incorporées dans l'architecture proposée. Puis, deux nouveaux modèles VCHCT et SCHCT sont développés.

Principe de la solution proposée

Comme montré dans la figure 3.21, le réseau de capteur se compose de N nœuds capteur déployés aléatoirement sur une surface de $(M \times M)m^2$. Le Sink est en dehors de la surface de déploiement et agit comme une station de base pour accomplir la tâche d'émission de l'information et réception des paquets. Tous les nœuds capteur sont synchronisés par le Sink. En outre, chaque nœud ayant un paquet de L bit à transmettre au cluster-head, entame une action d'agrégation sur les données et coopère avec d'autres cluster-heads pour former la rangée d'antennes virtuelle de sorte que les données agrégées puissent être transmises par des techniques MIMO.

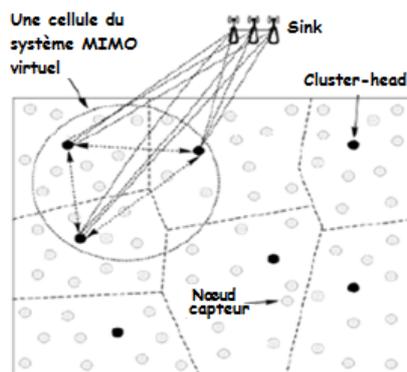


FIGURE 3.21 – Le modèle du système proposé pour la transmission MIMO.

VCHCT et SCHCT se déroulent en phases et chaque phase se compose des trois étapes suivantes :

- 1) **Phase de formation des clusters** : tous les nœuds capteurs s'auto-organisent en clusters en se basant sur l'algorithme distribué LEACH. Au début de chaque phase, chaque nœud s'élit comme cluster-head avec une probabilité P . Chaque cluster-head diffusera un message aux autres nœuds capteurs qui sont à sa portée de transmission en employant le protocole CSMA, le message contient l'identifiant (ID) du cluster-head, les nœuds capteur choisissent un des cluster-heads pour former le cluster en

se basant sur la puissance du signal du message de diffusion reçu et qui consiste en une requête de demande pour joindre le cluster-head le plus proche, le cluster-head enregistrera l'ID des membres de clusters. Après la formation du cluster. Le cluster-head crée un programme TDMA et le diffusera pour les membres du cluster.

2) Phase de communication intra-cluster : les membres de chaque clusters transmettront leurs données au cluster-head pendant le time slot de transmission allouer et qui est spécifier par le programme TDMA durant la phase de formation des clusters et ils seront endormit dans d'autres slots pour économiser de l'énergie. Après que le cluster-head ait reçu les données des membres de son cluster, il exécutera le processus d'agrégation pour éliminer les données redondantes.

3) Phase de transmission coopérative : les différences principales entre VCHCT et SCHCT sont à cette étape. Après l'agrégation, les cluster-heads attendent un message de diffusion du Sink. Une fois le message reçu, les cluster-heads répliquent avec un message de réponse qui contient leur ID et des informations sur l'endroit de chaque cluster-head.

En se basant sur cette information, le Sink regroupe des cluster-heads dans des cellules MIMO virtuelles et conçoit un programme TDMA, pour celles-ci, qui décidera de la cellule MIMO virtuelle qui transmettra en premier puis la seconde, et ainsi de suite.) Ces groupes ainsi que les informations du programme TDMA seront diffusés à chaque cluster-head. Puis les cluster-heads qui font partie des cellules MIMO virtuelles coopéreront pour former le déploiement de l'antenne virtuelle de sorte que la transmission MIMO puisse être mise en application.

Pour VCHCT, puisqu'il n'y a aucun besoin de codage, les cluster-heads qui font partie de la cellule virtuelle transmettront les données de manière simultanée seulement au

Sink suivant le programme de l'intervalle du temps alloué. Quant à SCHCT, chaque cluster-head dans la cellule MIMO virtuelle diffuse d'abord ses informations à tous les autres cluster-heads qui se trouvent également dans la cellule MIMO virtuelle en utilisant le protocole CSMA. En parle donc de communication inter-cluster. Après que tous les cluster-heads aient reçus les bits d'information par d'autres cluster-heads dans la même cellule MIMO virtuelle, ils codent les séquences de données selon l'encodage STBC en prenant en compte l'intervalle du temps alloué.

Energie totale consommée par le modèle proposé

En raison de l'utilisation de deux techniques MIMO différentes, les nouveaux modèles utilisées dans cette architecture ont des caractéristiques différentes. Il semble que VCHCT est plus efficace en énergie que SCHCT, puisque dans VCHCT il n'y a besoin de codage intra-cluster ou de communication inter-cluster entre les cluster-heads coopérants. Tandis que dans SCHCT, chaque cluster-heads coopérant a besoin de communiquer avec d'autres afin de faire conjointement le codage. Mais il est clair que STBC peut réaliser non seulement la diversité à la transmission mais également à la réception, alors que le V-BLAST réalise seulement la diversité à la réception. Pour le modèle SCHCT, l'énergie consommée durant une seule phase est l'énergie consommée composée par les cluster-heads ainsi que celle consommée par les nœuds capteurs.

L'énergie consommée par un cluster-head est l'énergie consommée suite à :

- La réception des données envoyées par les membres de son cluster.
- L'agrégation des données par le cluster-head.
- La réception des données agrégées par les cluster-heads coopératifs.
- La transmission des données agrégées aux autres cluster-heads coopératifs.
- La transmission des données au sink.

Pour les nœuds capteur ordinaires, leur action se limite seulement à la transmission des données aux cluster-heads.

La consommation globale en énergie du modèle SCHCT, durant une phase, peut être dérivée par :

$$E_{T_SCHCT} = K_c E_{cluster} = (N - K_c) E_s + K_c E_{CH_SCHCT} \quad (3.28)$$

Où :

- K_c : est le nombre de cluster.
- $E_{cluster}$: est l'énergie consommé par un cluster.
- E_s : est l'énergie consommé par les nœuds capteurs.
- E_{CH_SCHCT} : est l'énergie consommé par un cluster-head.

Quant au schéma VCHCT, l'énergie totale consommée est égale à l'énergie consommé par les cluster-heads plus celle consommée par les nœuds capteurs ordinaires. Puisque avec VCHCT il n'y a pas de communication inter-cluster, la différence en termes d'énergie consommée entre SCHCT et VCHCT réside dans l'énergie consommée par le cluster-head. De ce fait, l'énergie totale consommée avec le modèle VCHCT durant une seule phase est donnée par :

$$E_{T_VCHCT} = (N - K_c) E_s + K_c E_{CH_VCHCT} \quad (3.29)$$

Où :

- E_{CH_VCHCT} : est l'énergie consommée par un cluster-head avec VCHCT.

Les auteurs supposent que chaque nœud possède un GPS (Global Positioning System) et peut ajuster sa puissance de transmission pour atteindre d'autres nœuds et le Sink si nécessaire. Ils supposent également que le Sink n'a pas de contrainte en énergie et est équipé de plus d'une antenne, ceci pour mettre en application la transmission MIMO.

Evaluation de performances

Les résultats numériques et de simulation montrent que les deux modèles peuvent réduire la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie du réseau de capteurs grâce à la transmission MIMO. En bref, quand le Sink est loin des capteurs, le modèle SCHCT est beaucoup plus efficace en énergie que LEACH et VCHCT même s'il consomme l'énergie additionnelle due à la communication inter-clusters. Quand le Sink est près du secteur des clusters, VCHCT est le meilleur.

Discussion et critiques

La solution proposée n'est pas efficace si le déploiement s'effectue sur une grande surface. En effet, les cluster-heads coopératifs sont supposés avoir une large portée de communication afin que les données puissent atteindre la station de base (Sink), ce qui n'est pas toujours une hypothèse réaliste.

3.11.9 V-BLAST-Based Virtual MIMO for Distributed Wireless Sensor Networks

Dans [72], les auteurs ont proposé un système MIMO virtuel pour les réseaux de capteurs sans fil basé sur le traitement du récepteur V-BLAST qui ne nécessite pas la coopération des capteurs du côté émetteur. Son efficacité énergétique est analysée pour des réseaux avec deux DGNs (Data Gathering Node) simples et multi-antennes. Dans un réseau de capteurs avec une DGN ayant une simple antenne, le système MIMO virtuel est réalisé via une communication locale du côté récepteur. La méthode proposée n'exige pas de codage (spatial) au niveau des nœuds répartis, ce qui élimine les étapes de traitement et de communication locales impliquées dans un système MIMO virtuel basé sur le schéma d'Alamouti. Les auteurs évaluent l'économie d'énergie et le délai d'un système

MIMO virtuel basé sur le récepteur V-BLAST. La dépendance des gains d'efficacité sur les paramètres du système, tels que la distance de transmission, la taille de constellation (taux de transmission) et la perte de trajet du canal sont étudiés.

Hypothèses

Le modèle proposé par les auteurs permet d'émettre les hypothèses suivantes : il existe N_T nœuds DCN (Data Collection Nodes) qui transmettent des données simultanément à un collecteur de données ou DGN doté de plusieurs antennes de réception N_R tel que $N_T \leq N_R$. Le signal de temps discret est reçu sur une bande étroite et l'évanouissement du signal est uniforme.

Principe de la solution proposée

a) **Coté émetteur** : tous les nœuds transmettent leurs données simultanément à la DGN comme dans un système classique V-BLAST. Puisque chaque nœud transmet ses propres données, aucun codage inter-capteur n'est exigé comme dans un système MIMO virtuel basé sur le schéma d'Alamouti. Ceci élimine le recours à des communications entre les nœuds de collecte de données (DCN). Les nœuds qui transmettent simultanément peuvent être spécifiés de plusieurs manières. Une des méthodes consiste à élire un nœud dans chaque cluster au cours de l'étape d'initialisation du réseau de capteurs. Dans un réseau de capteurs à organisation dynamique, des algorithmes dynamiques sont nécessaires à cet effet. Chaque groupe de nœuds envoie ses données en utilisant le multiplexage temporel. Dans une approche alternative, la DGN peut périodiquement élire les DCNs et peut demander des transmissions de données simultanées à un ensemble de nœuds choisis.

b) **Coté récepteur** : la DGN est supposée avoir une durée de vie beaucoup plus

longue (pas de contrainte énergétique) que les autres nœuds et peut être d'une grande dimension physique lui permettant d'avoir de multiples antennes de réception. Cela permet la réalisation d'un système MIMO réel avec un traitement V-BLAST sans avoir recours à des communications locales comme c'est le cas avec les précédentes implémentations MIMO virtuelles.

Evaluation de performances

L'énergie totale par bit requise pour un système à taux de transmission fixe peut alors être estimée comme suit :

$$E_{bt} = \frac{P_{PA} + P_C}{R_b} = \frac{3C_1}{\eta} \times \frac{(M + 1 - 2\sqrt{M})}{M - 1} d^{\kappa} \times \bar{E}_b + \frac{P_C}{R_s N_T \log_2(M)} \quad (3.30)$$

Où :

- P_{PA} : est la consommation électrique des amplificateurs.
- P_C : est l'énergie totale consommée en blocs de circuits (émetteur / récepteur).
- R_b : est le débit binaire du système.
- C_1 : est une constante.
- R_s : symboles par seconde et le taux de symboles (ou taux de modulation) d'un capteur individuel.
- η : est l'efficacité du canal de l'amplificateur de puissance RF (Radio Frequency).
- N_T : nombre de nœuds à l'émission.
- \bar{E}_b : est l'énergie moyenne par bit requise pour un taux d'erreur binaire donné (BER).
- b : est la distance de transmission.
- κ : est le paramètre d'atténuation du signal.

- M : ordre de modulation.

Les résultats numériques montrent l'importante économie en énergie offerte par la méthode proposée (V-BLAST) par rapport au système SISO traditionnel. Par ailleurs, l'optimisation de la distance de transmission n'est indispensable que dans les systèmes MIMO virtuels basés sur un schéma d'Alamouti.

Discussion et Critiques

En raison des communications locales impliquées du côté du récepteur, le système proposé avec DGN ayant une seule antenne entraîne généralement des retards relativement importants. De plus, proposer un algorithme dynamique pour l'élection d'un nœud dans chaque cluster risque d'être coûteux en énergie, et par conséquent réduire les performances du système.

3.12 Conclusion

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 très longtemps et où la consommation d'énergie est la contrainte la plus importante. La coopération entre les nœuds capteurs est possible tant à l'émission qu'à la réception pour former un système MIMO coopératif. Ce chapitre, donne une vue globale sur les systèmes MIMO dans les réseaux de capteurs sans fil qui ont comme objectifs d'accroître la portée du signal, d'augmenter la qualité du lien radio et par conséquent se prémunir contre les évanouissements du canal et de prolonger la durée de vie du réseau. Nous avons mis en évidence la technique MIMO et présenté quelques travaux que nous avons jugés intéressants pour démontrer les avantages de ce type d'architecture dans les réseaux de capteurs sans fil.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter en détail notre proposition qui est une nouvelle technique MIMO (2×2) coopératives. La solution proposée vise à équilibrer la charge de travail dans le réseau et ce à travers un bon regroupement des capteurs en clusters et à utiliser une stratégie de coopération efficace en termes d'énergie, et cela pour maximiser la durée de vie du réseau.

Proposition d'une stratégie MIMO (2×2) coopérative pour les RCSFs

4.1 Introduction

Pour remédier au problème de consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil, nous avons, entre autres, besoin d'un protocole de routage ou encore d'une stratégie qui prolongera la durée de vie du réseau. Des solutions ont été proposées pour remédier à cet inconvénient tel que les topologies hiérarchiques. La clusterisation dans les réseaux de capteurs, par exemple, est un moyen efficace pour structurer le réseau. La technologie MIMO est l'une des techniques de transmission/ réception jugée performante en terme d'optimisation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil. Ces solutions nous ont permis d'apporter une modeste contribution quant au problème posé.

Ce chapitre présente notre stratégies BLAC-MIMO (2×2) proposées pour les réseaux de capteurs sans fils que nous avons nommé BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO (Battery-Level Aware Clustering-MIMO), dont l'objectif principal est de réduire au minimum l'énergie consommée dans la communication de données de sorte à maximiser la durée de vie du réseau.

4.2 Motivation

Les applications des réseaux de capteurs deviennent de plus en plus diversifiées. Cependant, pour que ces réseaux puissent accomplir au mieux leurs tâches, il est impératif de les décharger de divers aléas. Ces réseaux nécessitent donc des algorithmes économes en énergie de façon à satisfaire leurs capacités matérielles et les besoins de l'application, à cet effet, nous nous sommes intéressés au protocole de routage hiérarchique BLAC (Battery Level Aware Clustering).

BLAC est une nouvelle famille d'algorithmes pour le clustering qui considère la combinaison du niveau d'énergie restante à d'autres métriques (degré ou la densité des nœuds) pour l'élection du Cluster-Head et la formation des clusters. Grâce à l'intégration du niveau de batterie dans la métrique utilisée pour le choix des cluster-heads, le protocole BLAC équilibre la consommation énergétique entre tous les nœuds et maximise donc la durée de vie pendant laquelle tous les nœuds du réseau sont opérationnels.

Avec le protocole BLAC, les nœuds capteurs doivent être équipés d'une puce GPRS économe leur permettant une transmission directe vers la station de base, qui en plus d'être une forte contrainte, fait que BLAC est considéré comme un protocole coûteux en termes d'énergie car le GPRS est très gourmand en énergie. D'autre part, nous savons que la technique MIMO est meilleure en termes de gains énergétiques que les autres techniques de transmission/réception des données (SISO, MISO, SIMO et MIMO). De plus, elle assure une transmission fiable, augmente le débit ainsi que la portée, palliant ainsi aux problèmes liés à la nature des ondes et à leur comportement suivant l'environnement, par conséquent nous avons pensé à étendre une partie du protocole BLAC grâce à l'utilisation d'une stratégie de coopération MIMO (2×2) dans le but de fournir des performances avantageuses. Cette technique vise à maintenir la topologie du réseau et minimiser la consommation

d'énergie en tenant compte de la spécificité de ces réseaux et de leurs contraintes.

4.3 Principe de la Proposition

Divers études ont démontré que l'organisation du réseau en structure cellulaire est un moyen très efficace pour réduire la consommation énergétique du réseau, par conséquent nous proposons d'organiser le réseau en clusters. Nous nous sommes, de ce fait, intéressé à la phase de clusterisation du protocole de routage BLAC [76] qui a pour but de former des clusters et d'élire des cluster-heads. Afin d'équilibrer le surplus de consommation des cluster-heads, il est nécessaire de faire jouer ce rôle à tour de rôle par les différents nœuds. Pour acheminer les informations vers la station de base, nous proposons une approche qui est une hybridation entre l'algorithme de routage hiérarchique BLAC et la stratégie MIMO (2×2). En effet, pour les communications intra-clusters et inter-clusters, notre choix s'est orienté vers une stratégie de coopération afin d'éviter la communication directe entre deux CHs qui est coûteuse en termes d'énergie et parfois impossible (cas où les CHs ne sont pas dans la même portée de transmission) et cela en utilisant deux nœuds coopératifs (NCs) en émission et en réception comme nœuds intermédiaires au lieu d'un seul dans le but de former un système MIMO (2×2) grâce à la fonction de coopération des deux paires (NCs).

4.3.1 Phase de formation des clusters

L'approche de clusterisation consiste à partitionner le réseau en un certain nombre de clusters homogènes selon une métrique spécifique ou une combinaison de métriques, et de former une topologie virtuelle. Pour équilibrer la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil, nous avons repris uniquement la phase de clusterisation dans l'algorithme BLAC [76]. Cette méthode de clusterisation repose, d'une part, sur l'énergie

résiduelle (notée $B(u)$) et d'autre part, sur le degré (notée $\delta(u)$) ou de la densité (notée $\rho(u)$) d'un nœud selon la variante de l'algorithme utilisé.

Le degré est défini par $\delta(u) = |N(u)|$ avec $N(u)$ le voisinage de u .

La densité est donc le rapport entre le nombre de liens entre u et ses voisins plus le nombre de liens entre les voisins de u , et le nombre de ses voisins (par définition, son degré). La densité est définie par :

$$\rho(u) = \frac{|(v, w) \in E | v \in \{u, \mathcal{N}(u)\}, w \in \mathcal{N}(u)|}{\delta(u)} \quad (4.1)$$

Périodiquement, chaque nœud calcule $\rho(u) \times B(u)$ (respectivement $\delta(u) \times B(u)$ selon la variante de l'algorithme BLAC) et la diffuse localement à son 1-voisinage. Chaque nœud est alors en mesure de comparer sa propre valeur $\rho(u) \times B(u)$ (respectivement $\delta(u) \times B(u)$) à celle de ses voisins. À partir de là, un nœud décide soit de s'élire comme Cluster-Head (s'il détient la plus forte valeur), soit de choisir comme père son voisin de plus forte valeur. En cas d'égalité, afin de privilégier la stabilité de la structure, le nœud choisi sera celui de plus petit identifiant.

Les figures 4.1 et 4.2 illustrent le calcul de $\rho(u) \times B(u)$ et la formation des clusters. Sur la figure 4.1, le nœud c envoie un message hello contenant son Id au nœud h , les autres nœuds font de même ; h connaît donc tous ses voisins. Le nœud h envoie un nouveau message hello contenant la liste de ses voisins, c la reçoit et connaît donc son 2-voisinage.

Dans la figure ci-dessous, le nœud c calcule $\rho(u) \times B(u)$ (valeur sur le schéma) et la transmet à ses voisins. h la reçoit, de même que celle de ses autres voisins. Le nœud h décide alors de choisir m comme parent car sa valeur est plus élevée. m quant à lui devient cluster-head car il détient la valeur ($\rho(u) \times B(u)$) la plus élevée de son voisinage.

Si un nœud u choisit le nœud w , alors w est le père de u (noté $P(u) = w$) et donc u est un fils de w dans l'arbre de clustering. L'algorithme 2 décrit le comportement de

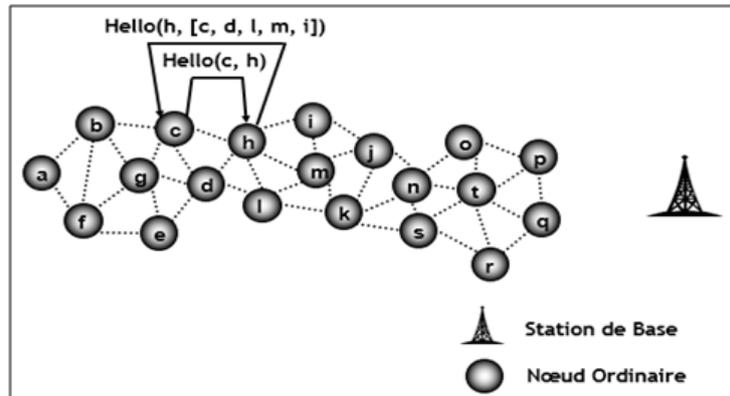


FIGURE 4.1 – Protocole BLAC : Découverte des voisins.

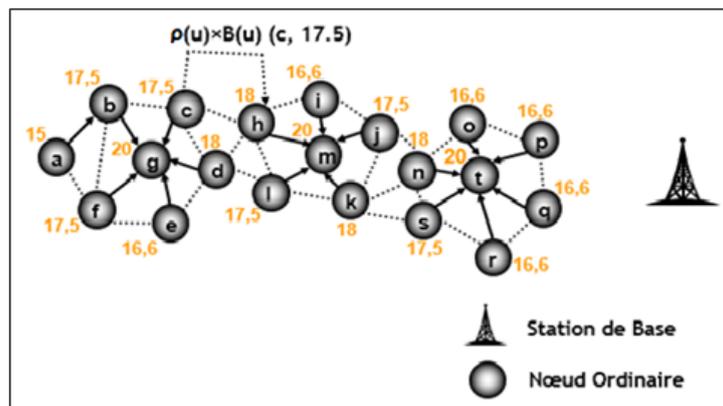


FIGURE 4.2 – Protocole BLAC : Rattachement des capteurs aux cluster-heads

chaque nœud du réseau, où $h(u)$ est la métrique utilisée à savoir $\rho(u)$ ou bien $\delta(u)$, selon la variante de l'algorithme BLAC.

Algorithm 2 : Algorithme BLAC-bg, BLAC-bs exécuté sur chaque nœud u .

```

 $C_h \leftarrow 0$ ;
 $C_j \leftarrow \infty$ ;
Pour ( $i=1$  à  $|N(u)|$ ) faire
si ( $C_h < h_i \times B(i)$ )  $\vee$  [ $(C_h = h(i) \times B(i)) \wedge (Id(i) < C_i)$ ] alors
 $P(u) \leftarrow i$ ;
 $C_h \leftarrow h(i) \times B(i)$ 
 $C_h \leftarrow Id(i)$ 
Fin si
Fin pour
si ( $h(u) \times B(u) > C_h$ )  $\vee$  [ $(h_u \times B(u) = C_h) \wedge (Id(u) > C_i)$ ] alors
/*  $u$  devient cluster-head*/
 $p(u) \leftarrow u$ 
Fin si
Fin;

```

4.3.2 Phase de sélection des nœuds coopératifs

C'est au niveau de cette phase de sélection de nœuds coopératifs dans les réseaux de capteurs sans fil que commence notre contribution. Cette phase a pour but de réduire la perte de message et d'augmenter la durée de vie du réseau en se basant sur l'établissement et l'utilisation de chemins assurant une dépense énergétique minimale. L'approche de sélection de nœuds coopératifs se base sur trois critères : L'énergie résiduelle qui doit être maximisée contrairement au deuxième critère à savoir le nombre de saut (la visibilité par rapport à la station de base) qui est un paramètre qu'on doit minimiser. Le troisième critère est la distance entre les nœuds coopératifs émetteurs d'un cluster émetteur et les nœuds coopératifs récepteurs du cluster voisin (prochain saut) qui quant à lui, doit être minimisée. La puissance du signal reçu est utilisée pour estimer la distance entre deux capteurs (entre le nœud coopératif émetteur et récepteur). L'indicateur de puissance du signal reçu (RSSI) est une estimation par le composant radio du niveau de la puissance

du signal reçu.

Pour les besoins du protocole, chaque nœud capteur doit être doté d'une table de voisins qui contient une entrée pour chaque nœud qui se trouve dans sa portée de transmission tel que chaque nœud calcule et garde localement sa propre distance à la station de base en termes de nombre de sauts. De plus, chaque nœud capteur possède une table de voisinage contenant une entrée pour chaque voisin direct. Cette entrée contient l'identificateur du nœud, le nombre minimal de sauts jusqu'à la station de base, ainsi que l'énergie restante au niveau de ses voisins.

Dans un cluster, deux nœuds sont choisis comme nœuds coopératifs émetteurs et deux autres comme nœuds coopératifs récepteurs. Un nœud peut donc être à la fois émetteur et récepteur. Pour réduire au minimum la distance entre les nœuds coopératifs émetteurs et les nœuds coopératifs récepteurs, le cluster-head (CH) du cluster émetteur se charge de l'élection de deux paires de nœuds coopératifs émetteurs et récepteurs.

De ce fait avec la stratégie BLAC-MIMO (2×2), quatre types de nœuds : nœuds ordinaires, nœuds coopératifs émetteurs, nœuds coopératifs récepteurs et le cluster-head. Les nœuds ordinaires collectent et rassemblent des données de l'environnement et les transmettent au cluster-head. Celui-ci agrège les données et les transmet aux nœuds coopératifs émetteurs qui se chargeront de la transmission aux nœuds coopératifs récepteurs du cluster voisin ou envoie les données directement à la station de base si celle-ci se trouve dans sa portée de transmission. La figure 4.3 montre trois clusters avec des nœuds coopératifs émetteurs et récepteurs différents. Par exemple, le cluster 3 n'a pas de nœuds coopératifs émetteurs, car le CH appartient à la station de base dans son voisinage c'est donc lui qui communique directement avec cette dernière.

Le cluster 2 contient deux nœuds coopératifs émetteurs qui communiquent avec 2 nœuds

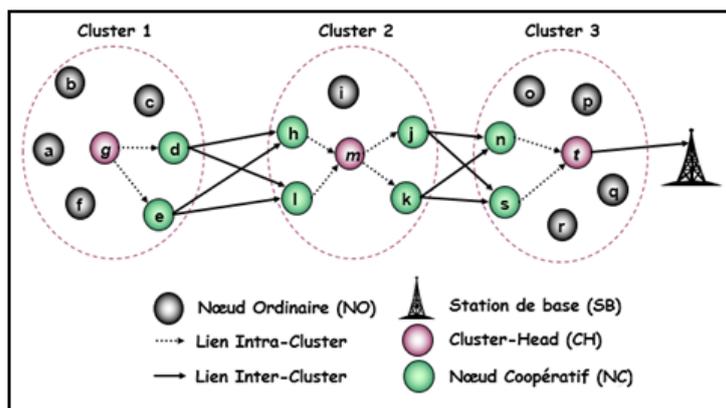


FIGURE 4.3 – BLAC-MIMO : Réseaux MIMO virtuel.

coopératifs récepteurs du cluster 3. Il s'agit d'une communication multi-saut du cluster 2 au cluster 3 puis du cluster 3 à la station de base. De même, les deux nœuds coopératifs émetteurs du cluster 1 communiquent avec 2 nœuds coopératifs récepteurs du cluster 2 et ainsi de suite jusqu'à ce que les données atteignent la station de base.

L'algorithme 3, ci-dessous, est proposé afin d'élire les nœuds coopératifs

Algorithm 3 : Algorithme d'élection de nœuds coopératifs.

/* la liste contient tous les CHs */

Tantque ($Liste \neq \emptyset$) **faire**

$CH_{min} \leftarrow \text{ExtraireMIN}(Liste)$;

$\text{EstimationEnergieMIMO}(CH_{min})$;

$CH_{min}(T) \leftarrow \{t_1 \dots t_n\}$;

$CH_{min}(R) \leftarrow \{r_1 \dots r_m\}$;

$Liste \leftarrow Liste - CH_{min}$;

FinTantque;

Initialement, une liste contient tous les CHs des différents clusters. D'abord, le CH qui a l'énergie minimum, CH_{min} , est choisi parmi la liste. Puis, la paire la plus efficace en énergie des nœuds coopératifs émetteurs et récepteurs de la stratégie BLAC-MIMO (2×2) entre deux clusters émetteurs et récepteurs dont le CH_{min} appartient au cluster émetteur est obtenue. Les critères du choix des nœuds coopératifs sont basés sur l'énergie résiduelle, le nombre de sauts et la distance, choses qui nous permet d'obtenir une consommation

d'énergie minimale.

Un sous-ensemble de nœuds émetteurs sont associés au CH_{min} par l'opération $CH_{min}(T)$, cette opération en question renvoie une liste de nœuds émetteurs potentiels, ces derniers doivent posséder une énergie résiduelle plus grande que l'énergie seuil, celle-ci est définie comme étant la moyenne des énergies résiduelles des nœuds appartenant au cluster dont le CH est le CH_{min} , de même, l'opération $CH_{min}(R)$ renvoie un sous-ensemble de nœuds récepteurs potentiels du cluster voisin associés au CH_{min} .

Il convient de noter que $(t_1 \dots t_n)$ est l'ensemble de nœuds coopératifs émetteurs du cluster émetteur et $(r_1 \dots r_m)$ est l'ensemble de nœuds coopératifs récepteurs d'un cluster voisin (prochain saut). Le processus ci-dessus est répété pour tous les CHs dans la liste. La section suivante décrit un exemple du processus de sélection des nœuds coopératifs émetteurs et récepteurs.

Nous pouvons avoir une cardinalité de nombre de capteur égale à 1 pour tous émetteurs et récepteurs, dans ce cas ce serait une transmission SISO (exemple CH du cluster 3 et la station de base), cette technique est efficace pour les courtes distances.

4.3.2.1 Exemple de sélection des nœuds coopératifs émetteurs et nœuds coopératifs récepteurs

Les détails de la technique de sélection des nœuds coopératifs émetteurs/récepteurs sont comme suit :

1. Pour chaque nœud émetteur potentiel (Son énergie résiduelle doit être plus grande que l'énergie seuil, celle-ci peut être définie pour être la moyenne de l'énergie résiduelle de tous les nœuds vivants dans le cluster), le CH du cluster émetteur permettra de déterminer les nœuds récepteurs potentiels les plus proches de ces nœuds émetteurs et de la station de base.

2. Le CH du cluster émetteur choisira les paires émetteurs-récepteurs possédant un nombre de sauts plus petit :
 - Le CH recherche dans sa table de voisinage les deux nœuds récepteurs potentiels du cluster voisins proches de ces nœuds émetteurs potentiels possédant un compteur de sauts plus petit que le sien (plus proche de la station de base).
 - S'il n'y a pas de nœuds récepteurs potentiels voisins qui possèdent un compteur de sauts plus petit, alors le CH cherche deux nœuds récepteurs potentiels qui possèdent le même nombre de sauts que le CH du cluster émetteur.
3. Les paires émetteurs-récepteurs possédants le nombre de sauts le plus petit par rapport à la station de base sont triées de manière croissante en fonction de la distance.
4. Le CH du cluster émetteur choisira deux nœuds coopératifs émetteurs, et deux nœuds coopératifs récepteurs appartenant au même cluster, de la liste triée.
5. Si le nombre de nœuds coopératifs émetteurs ou récepteurs sont inférieures à deux, les nœuds les plus proches des nœuds coopératifs émetteurs et récepteurs choisis, seront sélectionnés.

Dans la figure ci-dessous, nous illustrerons les différentes étapes qui interviennent lors de la phase de sélection des nœuds coopératifs émetteurs et nœuds coopératifs récepteurs :

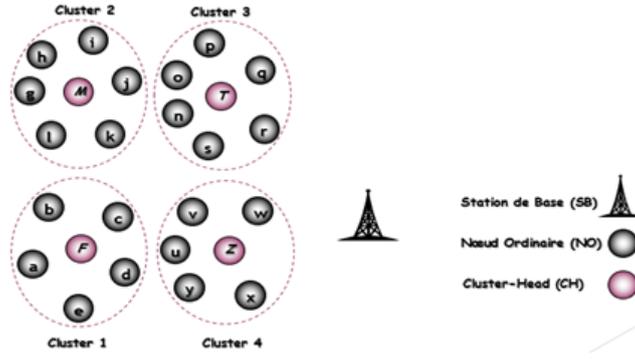


FIGURE 4.4 – Sélection des nœuds coopératifs émetteurs et nœuds coopératifs récepteurs.

Par exemple, nous considérons un cluster émetteur (cluster 1 sur la figure 4.4) contenant quatre nœuds émetteurs potentiels a, b, c, d et un cluster récepteur (cluster 4 sur la figure 4.4) contenant trois nœuds récepteurs potentiels u, v, y et un second cluster récepteur (cluster 2 sur la figure 4.4) contenant quatre nœuds récepteurs potentiels g, l, k et j. Nous considérons le cas où nous devons choisir 2 émetteurs et 2 récepteurs. D'abord, les paires émetteur-récepteur sont choisies :

Sachant que $d(\alpha, \beta)$ est la distance entre un nœud émetteur potentiel α du cluster émetteur et un nœud récepteur potentiel β du cluster voisin (prochain saut).

$$d(c, v) = 10, d(c, u) = 12, d(c, y) = 15, d(d, v) = 13, d(d, u) = 8, d(d, y) = 14, d(b, l) = 9, \\ d(b, k) = 11, d(c, k) = 12, d(c, l) = 14.$$

Sachant que $S(r, SB)$ est le nombre de sauts entre les nœuds récepteurs potentiels d'un cluster et la station de base :

$$S(u, SB) = 1, S(v, SB) = 1, S(y, SB) = 1, S(g, SB) = 2, S(l, SB) = 2, S(k, SB) = 2, \\ S(j, SB) = 2.$$

La liste des paires choisies est celle des nœuds dont le nombre de sauts est le plus petit :

$$d(c, v) = 10, d(c, u) = 12, d(c, y) = 15, d(d, v) = 13, d(d, u) = 8, d(d, y) = 14.$$

Ensuite, la liste des paires est triée : $d(d, u) = 8, d(c, v) = 10, d(c, u) = 12, d(d, v) = 13, \\ d(d, y) = 14, d(c, y) = 15.$

Étant donné que seuls deux émetteurs sont nécessaires, les paires suivantes $d(d, u) = 8$ et $d(c, v) = 10$ sont choisies. Les émetteurs sont d et c et les récepteurs potentiels appartenant au même cluster et qui ont le nombre de sauts le plus petit sont u et v .

Nous devons savoir que l'efficacité de la stratégie MIMO diffère selon le nombre d'émetteurs et de récepteurs choisis. En effet, il est clair que si le nombre de nœuds coopératifs augmente, la transmission devient plus fiable, toutefois, l'énergie consommée augmente également, chose qui désavantage l'utilisation de plusieurs émetteurs et récepteurs étant donné l'importance de l'économie d'énergie dans notre travail. Considérant maintenant un cas où nous devons choisir 2 émetteurs et 3 récepteurs MIMO (2×3). Comme le nombre requis de récepteurs est 3, nous avons besoin d'un autre récepteur appartenant au même cluster que les précédents. Le troisième récepteur est choisi parmi les récepteurs qui sont les plus proches de u et de v . Si le voisin le plus proche de u est y , y sera choisi comme troisième récepteur.

4.3.3 Description de la de transmission des données intra-cluster et inter-clusters

4.3.3.1 Communication intra-clusters

Chaque nœud envoie les données recueillis à son cluster-head grâce à la liaison radio à basse consommation, celui-ci agrège les données rassemblées par des procédures de fusion, et les achemine à la station de base.

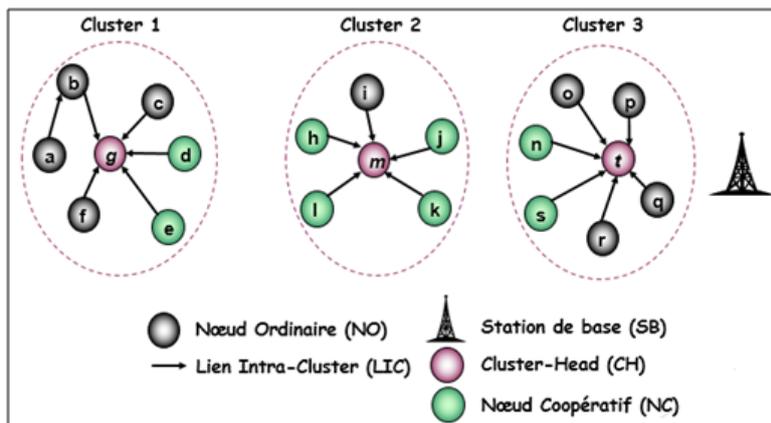


FIGURE 4.5 – Communication intra-clusters.

4.3.3.2 Communication inter-clusters

Lorsque le cluster-head reçoit des trames de données de ses membres de cluster, il les agrège et les diffuse à 2 nœuds coopératifs émetteurs. Après que les nœuds coopératifs émetteurs aient reçu le paquet de données, ils codent les données en utilisant le codage spatio-temporel par bloc (STBC) et les transmettent aux nœuds coopératifs récepteurs. L'avantage d'utiliser la technique STBC est qu'elle fournit le gain de diversité dans les deux cas d'émission et de réception avec le système MIMO (2×2) coopératif. Le gain de diversité fournit une transmission efficace en termes d'énergie et de fiabilité. Les nœuds coopératifs de réception utilisent des informations sur l'état du canal pour décoder les données spatio-temporelles codées. Une fois choses faites, les nœuds coopératifs transmettent les données décodées à leur cluster-head et le processus se répète jusqu'à ce que la station de base soit à portée du cluster-head et donc la transmission ce fait directement en un seul saut.

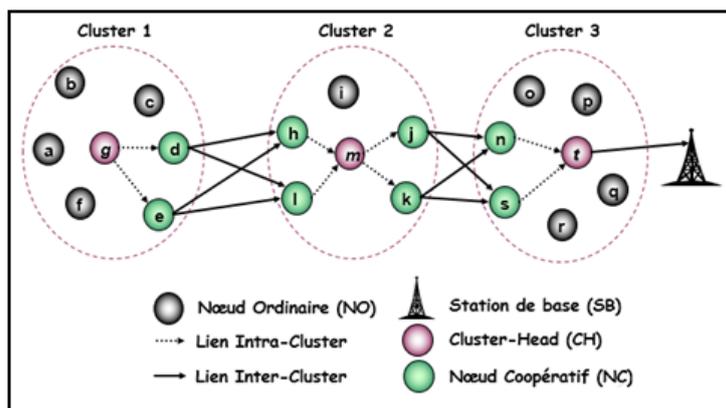


FIGURE 4.6 – Communication inter-clusters.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détails le principe de l'approche proposée. En résumé, notre solution consiste à appliquer la technique MIMO (2×2) sur un protocole de routage hiérarchique BLAC et ce, dans le but de réduire d'avantage la perte d'énergie et d'assurer une meilleure transmission dans les réseaux de capteurs sans fil.

Afin de valider notre proposition, nous comparons BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO par simulation avec des algorithmes usuels à savoir les deux variantes du protocole BLAC (BLAC-bg et BLAC-bs) et le protocole VCA.

Dans le chapitre suivant. Nous évaluons les performances de BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO en termes du nombre moyen de clusters formés, du nombre moyen de nœuds par cluster, du nombre moyen de clusters solitaires formés, du nombre moyen de nœuds coopératifs, d'énergie consommé et enfin de la probabilité de réception des paquets durant toute la durée de vie du réseau. En se basant sur les performances, nous allons illustrer l'apport de la stabilité des algorithmes de routages que nous avons proposés.

Simulation et évaluation de performances

5.1 Introduction

La simulation est un processus qui consiste à concevoir un modèle du système (réel) étudié, mener des expérimentations sur ce modèle, interpréter les observations fournies par le déroulement du modèle et formuler des décisions relatives au système, en d'autres termes, il 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.

Il existe de nombreux simulateurs capables de gérer les réseaux de capteurs sans fil (NS-2 [1], OMNet++ [6], Glomosim [35], SENSE [21], TOSSIM [62], BOIDS [8] et Shawn [65], etc.). Cependant, ces simulateurs sont beaucoup trop lourds et peu adaptés à nos besoins. En effet, ils sont parfois dédiés à des architectures spécifiques. Ces raisons nous ont amenés à concevoir notre propre simulateur en utilisant le langage java et ceux afin de valider le protocole proposé.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par la présentation des différentes métriques que nous allons prendre en considération lors de l'évaluation de performances du protocole BLAC-MIMO proposé avec ses deux variantes (BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO).

Nous décrivons notre système et nous donnerons ensuite une brève description de l'environnement de simulation. Nous terminons par l'analyse des résultats obtenus en comparant ceux de notre algorithme avec ceux des algorithmes (BLAC-bg, BLAC-bs) [76] et VCA (An Energy-Efficient Voting-Based Clustering Algorithm for Sensor Networks) [52].

5.2 Métriques considérées

Les comparaisons qui vont être effectuées afin d'évaluer les performances de notre protocole vont se focalisées essentiellement sur les métriques de performances suivantes :

- **Nombre moyen de clusters** : mesure le nombre moyen de clusters formés en fonction de la portée de transmission.
- **Nombre moyen de clusters solitaires** : mesure le nombre moyen de clusters constitués d'un unique capteur-routeur.
- **Nombre moyen de nœuds par cluster** : calcul le nombre moyen de nœuds se trouvant dans un cluster.
- **Nombre moyen des nœuds coopératifs par cluster** : mesure le nombre moyen de nœuds coopératifs par cluster.
- **Énergie Consommée** : calcul l'énergie moyenne consommée par chaque nœud capteur.
- **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 en utilisant la formule suivante :

$$X = \frac{(d_i, Nbr_t)}{Nbr_r} \quad (5.1)$$

Où :

- X : est la probabilité de réception.
- d_i : est la distance entre deux cluster-heads.
- Nb_r : est le nombre total de nœuds intermédiaires.
- (d_i, Nbr_t) : 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.

5.3 Les paramètres de simulation

5.3.1 Description du système

Les entités qui composent le système sont essentiellement la station de base qui est responsable de la collecte des données et les nœuds capteurs qui détectent les événements et qui participent à la coopération et le routage de données dans le réseau. Il existe trois types de nœuds capteurs dans notre système :

- **Nœuds ordinaires** : ils détectent les événements et participent à l'émission et la réception de données dans le réseau.
- **Cluster-heads** : ils agrègent les données envoyées par les nœuds ordinaires de leur cluster. Ils sont également responsables de l'élection des nœuds coopératifs ainsi que le routage des données vers la station de base.
- **Nœuds coopératifs** : ils détectent les événements et participent à la coopération dans le routage des données dans le réseau.

5.3.2 Modèle d'énergie

Le modèle radio proposé par Heinzelman et al. [87] a été utilisé pour calculer l'énergie consommée pendant la transmission et la réception de données. Selon ce modèle l'énergie

consommée pendant l'émission et la réception des messages est donnée par :

$$E_e = E_{elec} * pk + E_{amp} * pk * d^2 \quad (5.2)$$

Par contre l'énergie consommée pendant la réception est :

$$E_r = E_{elec} * pk \quad (5.3)$$

Où :

- E_{elec} : est l'énergie électronique (énergie consommée par le transmetteur électronique) dont la valeur est fixée à 100 J/bit.
- pk : est la taille d'un message.
- E_{amp} : est l'énergie consommée par l'amplificateur de l'émetteur dont la valeur est fixée à 50 nJ/bit.
- d : est la distance en mètre entre l'émetteur et le récepteur.

5.4 Scénarios de simulation

Notre réseau est composée de 300 nœuds capteurs, répartis suivant une distribution aléatoire uniforme sur un terrain $(1000 \times 1000)m^2$, et d'une unique station de base placée aux coordonnées $(0,0)$. Dans les simulations réalisées, chaque nœud commence l'expérience avec le même niveau de batterie (*5joules*). A chaque émission ou réception, la quantité d'énergie correspondante à chacune des deux opérations est déduite du niveau actuel d'énergie du nœud capteur.

Les simulations démarrent avec une phase de clusterisation, puis vient une phase de recherche de nœuds coopératifs suivie par des transmissions journalières de données. Ce processus se poursuit de manière périodique à chaque tour de clusterisation.

5.4.1 Variables descriptives du système

Les paramètres de simulation de notre système sont présentés dans le tableau suivant :

Variable	Libellé	Type	Unité de mesure
E_e	Energie consommée lors de l'émission	double	Joule
E_r	Energie consommée lors de la réception	double	Joule
E_t	Energie consommée lors du traitement d'un message	Réel	Joule
$Energ_res$	Energie résiduelle d'un nœud capteur	double	joule
d	Distance entre deux nœud capteurs	float	Mètre
$Dist$	Distance entre un nœud capteur et une station de base	float	Mètre
(x, y)	Coordonnées d'un nœud capteur sur un plan 2D	double	Mètre
$Porte_trans$	Portée de transmission d'un nœud capteur	float	Mètre
$Nbre_clust$	Nombre de clusters	entier	/
$Nbre_voisin$	Nombre de voisins d'un capteur	entier	/
$Som_clusters$	Nombre de capteurs par cluster	entier	/
Som_coop	Nombre de capteurs coopératifs	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 E_x . L'énergie d'un capteur est mise à jour par l'affectation suivante :

$$E_c = E_c - E_x \begin{cases} E_x = E_e & \text{si le capteur envoie un message.} \\ E_x = E_r + E_t & \text{si le capteur reçoit un message.} \end{cases} \quad (5.4)$$

- **Coordonnées d'un nœud capteur sur un plan 2D** : deux valeurs aléatoires (x, y) comprises entre 0 et la taille du terrain, sont attribuées à chaque nœud capteur, sur un plan à deux dimensions.
- **Distance entre deux nœuds capteurs** : mesure la distance euclidienne entre deux nœuds capteurs dont les coordonnées sont respectivement (x, y) et (x', y') :

$$d = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \quad (5.5)$$

- **Distance entre un nœud capteur et une station de base** : mesure la distance euclidienne entre un nœud capteur et une station de base dont les coordonnées sont

respectivement (x, y) et $(0, 0)$:

$$d = \sqrt{(x)^2 + (y)^2} \quad (5.6)$$

5.4.2 Évènements discrets du système

Le tableau suivant représente l'ensemble des événements qui peuvent provoquer un changement d'état des variables descriptives de notre système dans le temps :

Evènement	Description
Calcul et diffusion de $\delta(u) \times B(u)$ (respectivement $\rho(u) \times B(u)$) selon la variante de l'algorithme local au 1-voisinage.	Cet évènement est l'évènement déclencheur de l'exécution des algorithmes de routage BLAC-bg-MIMO, BLAC-bs-MIMO, BLAC-bg et BLAC-bs.
Sélection des nœuds coopératifs.	Cet évènement se produit lorsqu'un CH émetteur lance la phase d'élection de nœuds coopératifs uniquement avec les protocoles BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO.
Choix des nœuds coopératifs.	Cet évènement se produit quand il y a des données à transmettre. Le CH du cluster émetteur choisira deux nœuds coopératifs émetteurs et deux nœuds coopératifs récepteurs appartenant au même cluster.
Mise à jour du nombre de clusters.	Cet évènement se produit à chaque auto-désignation d'un CH.
Mise à jour du nombre de nœuds capteurs par cluster.	Cet évènement se produit à chaque rattachement d'un nœud capteur à un CH par les protocoles BLAC-bg-MIMO, BLAC-bs-MIMO, BLAC-bg, BLAC-bs et VCA.
Mise à jour du nombre de nœuds coopératifs.	Cet évènement se produit à chaque sélection d'un nœud coopératif par les protocoles BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO.

TABLE 5.2 – Évènements discrets du système.

5.5 Evaluation de performances

Dans cette section, nous allons présenter et discuter les résultats de simulation obtenus suivant les métriques de performances que nous avons énumérées précédemment. Pour les expériences réalisées (nombre de clusters, nombre de nœuds capteurs par cluster, nombre de clusters solitaires, nombre de nœuds coopératifs, l'énergie consommée et la probabilité de réception des données) 50 exécutions indépendantes sont réalisées. Les résultats obtenus représentent la moyenne des résultats de toutes les exécutions. Pour les simulations réalisées, le paramètre variable utilisé est la portée de transmission des nœuds capteurs.

5.5.1 Nombre moyen de clusters

Le nombre moyen de clusters formés en fonction de la portée de transmission est illustré dans la figure 5.1. Comme nous pouvons le constater, le protocole BLAC-MIMO, avec ces deux variantes (BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO), créent un nombre de clusters égal au nombre de clusters formés par les variantes BLAC-bg et BLAC-bs respectivement, cela s'explique par le fait qu'à cette étape nos protocoles se confondent avec les protocoles de comparaisons choisis. En effet, la phase de clusterisation de BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO étant basée sur la phase de clusterisation des variantes BLAC-bg et BLAC-bs respectivement. C'est en toute logique, que le nombre moyen de clusters formés diminue avec l'augmentation de la portée de transmission des capteurs : plus le nombre de voisins de chaque capteur devient important, plus le nombre moyen de clusters formés diminue.

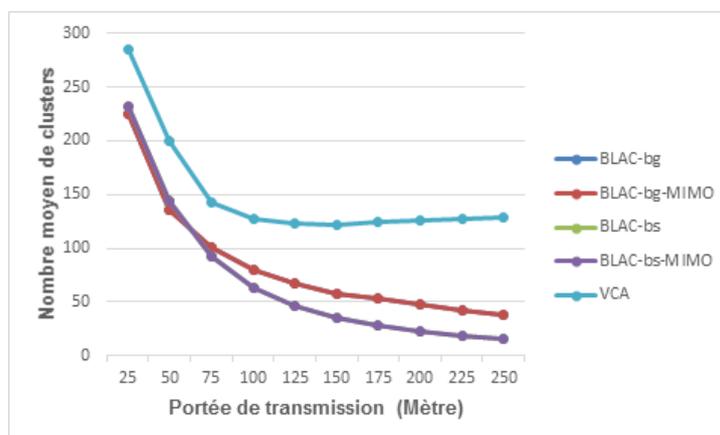


FIGURE 5.1 – Variation du nombre de clusters formés en fonction de la portée de transmission des capteurs.

On observe également, sur la même figure, que les algorithmes basés sur la densité (BLAC-bs-MIMO et BLAC-bs) créent un nombre de clusters égal à ceux formés par BLAC-bg-MIMO et BLAC-bg lorsque la portée de transmission des capteurs varie entre 25 et 75 mètres. Au-delà de 75 mètres le nombre de clusters formés par BLAC-bg et BLAC-bg-MIMO devient supérieur à ceux basés sur la densité (BLAC-bs et BLAC-bs-MIMO)

ce qui est à l'avantage de ce dernier. Nous expliquons ce phénomène par la résolution supérieure de la densité par rapport au degré, ce qui a tendance à créer des clusters plus profonds, donc plus grands. Concernant le nombre de clusters formés par VCA et comme nous pouvons le déduire de la figure 5.1, il est supérieur à celui obtenu avec les autres protocoles, et cela quelque soit la portée de transmission. Ce résultat est en faveur de notre protocole BLAC-MIMO.

5.5.2 Nombre moyen de nœuds capteurs par cluster

La figure 5.2 montre le nombre moyen de nœuds capteurs par cluster formé durant la phase de clusterisation avec les cinq algorithmes. Nous constatons que le nombre moyen de nœuds capteurs par cluster augmente avec la densification du réseau. Les algorithmes basés sur la densité (BLAC-bs-MIMO et BLAC-bs) créent un nombre de clusters légèrement inférieur au nombre de clusters formés par les algorithmes basés sur le degré (BLAC-bg-MIMO et BLAC-bg), comme nous l'avons déjà mis en évidence à travers la figure 5.1, ce qui implique un nombre de nœuds capteurs par cluster supérieur avec les algorithmes basés sur la densité par rapport à ceux basés sur le degré. Comme pour le nombre moyen de clusters, les variantes BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO se confondent avec BLAC-bg et BLAC-bs respectivement, la phase de clusterisation étant la même. On peut également constater, sur la même figure, que l'algorithme VCA forme un nombre moyen de nœuds capteurs par clusters inférieur à ceux créés dans les autres algorithmes, cela est dû au nombre élevé de clusters formés comme déjà mis en évidence dans la figure 5.1.

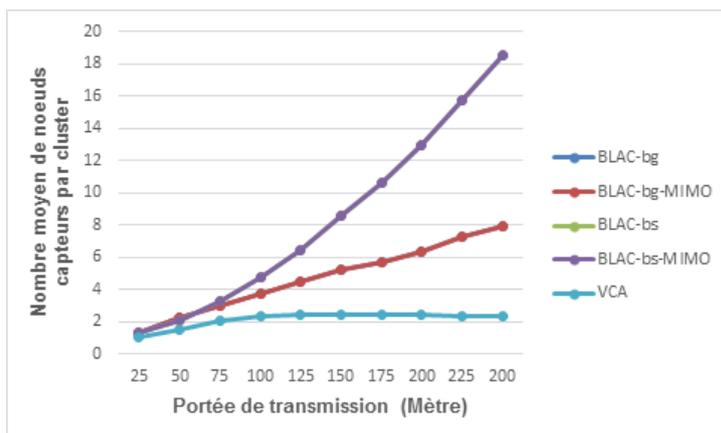


FIGURE 5.2 – Variation du nombre de nœuds capteurs par cluster en fonction de la portée des capteurs.

5.5.3 Nombre moyen de clusters solitaires

On peut remarquer à travers la figure 5.3 que le pourcentage de clusters solitaires formés par les deux variantes BLAC-bg et BLAC-bg-MIMO est nettement supérieur à celui des deux autres variantes à savoir BLAC-bs et BLAC-bs-MIMO et ce quelque soit la portée de transmission des capteurs. Cela est dû au fait que les protocoles basés sur le degré (BLAC-bg et BLAC-bg-MIMO) crée un nombre de clusters supérieur au nombre de clusters créer par les protocoles basés sur la densité (BLAC-bs et BLAC-bs-MIMO). Cela implique un nombre de nœuds par cluster plus petit pour BLAC-bg et BLAC-bg-MIMO, ce qui augmente donc la chance de formation de clusters solitaires par ces derniers.

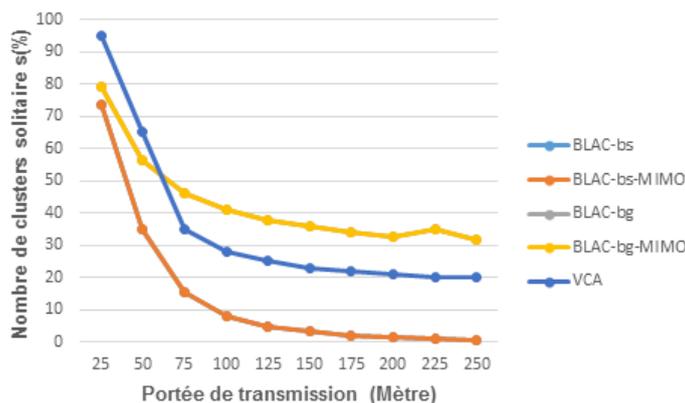


FIGURE 5.3 – Variation du nombre de clusters solitaires en fonction de la portée des capteurs.

On peut également constater la décroissance du nombre de clusters solitaires que ça soit pour les algorithmes basés sur la densité (BLAC-bs et BLAC-bs-MIMO) ou ceux basés sur le degré (BLAC-bg et BLAC-bg-MIMO) ainsi que pour l'algorithme de clusterisation VCA, et cela en fonction de la portée de transmission. Ceci est dû à l'augmentation du nombre de voisins de chaque capteur qui engendre une diminution du nombre de capteurs n'ayant aucun voisin. La phase de clusterisation des variantes BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO du protocole BLAC-MIMO étant basée sur la phase de clusterisation des deux autres variantes BLAC-bg et BLAC-bs du protocole BLAC respectivement, on pouvait s'attendre à ce que les variantes BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO créent un nombre de clusters solitaires égale aux variantes BLAC-bg et BLAC-bs respectivement. En outre, on constate à travers cette figure, que le protocole VCA crée un nombre de clusters solitaires plus grand que les deux autres protocoles (BLAC et BLAC-MIMO) pour une portée de transmission qui varie entre 25 et 62 mètres. Au-delà de 62 mètres, le nombre de clusters solitaires reste supérieure aux variantes BLAC-bs et BLAC-bs-MIMO et devient inférieur aux deux autres variantes à savoir BLAC-bg et BLAC-bg-MIMO. Ceci est le résultat de deux facteurs, le premier est, comme nous l'avons mentionné précédemment,

l'augmentation de la portée de transmission et le second est l'utilisation de la fonction d'équilibrage de charge qui permet de limiter les clusters solitaires.

5.5.4 Nombre moyen de nœuds coopératifs par cluster

La figure ci-dessous indique clairement que le nombre de nœuds coopératifs sélectionnés par BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO augmentent avec l'augmentation de la portée de transmission, et cela grâce à la stratégie de coopération que nous avons adoptée qui élit des nœuds coopératifs dans le cluster émetteur et le cluster récepteur. En effet, l'augmentation de la portée de transmission augmente le nombre de nœuds par cluster (comme le montre la figure 5.4) ce qui permet l'augmentation du nombre de nœuds coopératifs. Contrairement aux variantes du protocole BLAC-MIMO, BLAC-bg, BLAC-bs et VCA où le nombre des nœuds coopératifs reste nul pendant toute l'évaluation, ce qui est tout à fait logique. En effet, ces derniers n'adoptent pas une stratégie de coopération ce qui explique l'absence des nœuds coopératifs.

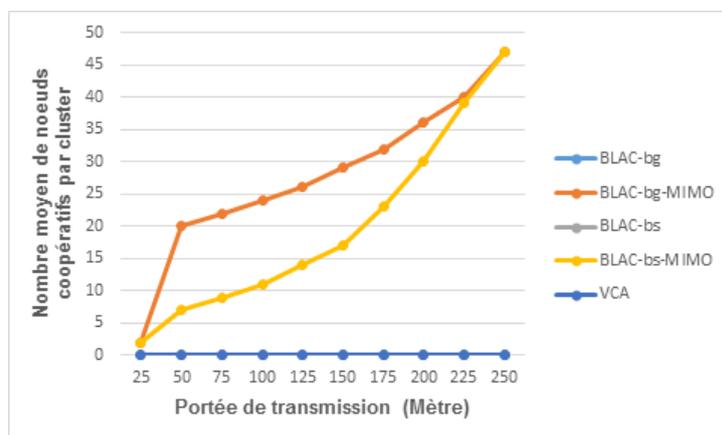


FIGURE 5.4 – Variation du nombre de nœuds coopératifs en fonction de la portée des capteurs.

Néanmoins, BLAC-bs-MIMO, crée un nombre de nœuds coopératifs inférieur à celui de BLAC-bg-MIMO. En effet, le nombre de nœuds par cluster formés par BLAC-bg-

MIMO est inférieur au nombre de nœuds par cluster formés par BLAC-bs-MIMO (Figure 5.4), ce dernier ne choisit que certains nœuds des clusters créés pour assurer la fonction de coopération étant donné le nombre important de nœuds formés par cluster, contrairement à BLAC-bg-MIMO qui, dans certains cas, se doit de choisir tous les nœuds des clusters formés comme nœuds coopératifs étant donné le nombre de nœuds limités par cluster.

5.5.5 Énergie Consommée

Du fait que les nœuds capteurs utilisent en général des batteries à durée de vie limitée, et que leur remplacement peut être impossible, l'énergie est une ressource critique, il est donc primordial de faire en sorte de réduire l'énergie consommée afin de permettre une plus grande longévité du réseau.

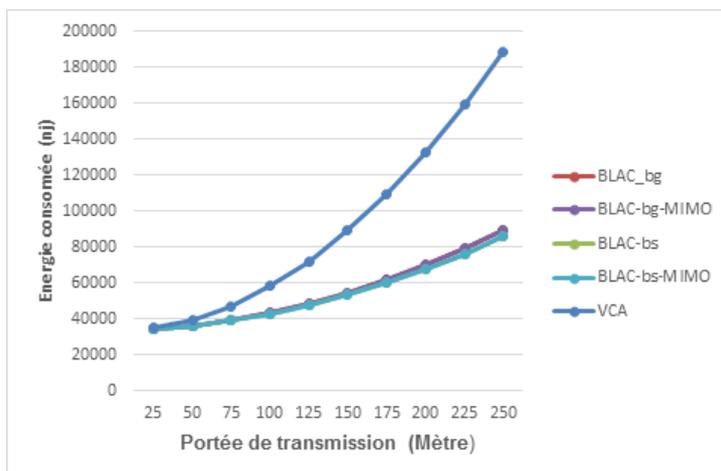


FIGURE 5.5 – Variation de la quantité d'énergie consommée durant la phase de clusterisation en fonction de la portée des capteurs.

La figure 5.5 montre l'énergie consommée par les nœuds capteurs durant la phase de clusterisation avec les deux variantes du protocole BLAC, les deux variantes du protocole BLAC-MIMO et l'algorithme VCA et cela en fonction de la portée de transmission. L'augmentation de la quantité de l'énergie consommée avec la densification est tout à fait logique puisque en augmentant la portée de transmission d'un capteur, on augmente le

nombre de capteurs dans son voisinage ce qui implique une augmentation du nombre de messages échangés entre les capteurs. C'est aussi en toute logique, que l'énergie consommée durant la phase de clusterisation par les variantes du protocole BLAC-MIMO, à savoir BLAC-bs-MIMO et BLAC-bg-MIMO consomme la même quantité d'énergie que les variantes du protocole BLAC à savoir BLAC-bs et BLAC-bg, respectivement, soit égale. La phase de clusterisation étant la même, les deux protocoles forment, d'une manière identique, un même nombre de clusters, et par conséquent ils consomment la même quantité d'énergie. En outre, la figure 5.5 indique une grande différence d'énergie consommée entre BLAC et BLAC-MIMO. Les deux variantes du protocole BLAC-MIMO permettent une conservation accrue de l'énergie au niveau des nœuds capteurs contrairement à BLAC qui, quand à lui, consomme une grande quantité d'énergie.

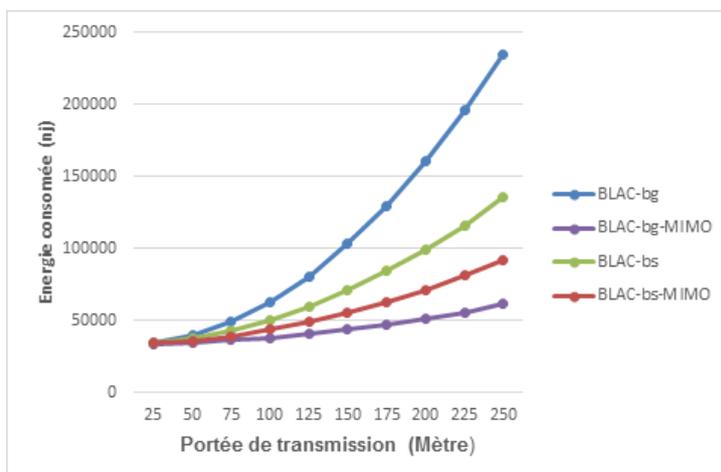


FIGURE 5.6 – Variation de la quantité d'énergie consommée par les clusters durant la phase de clusterisation et la phase de transmission de données en fonction de leur portée de transmission.

On constate, comme le montre la figure 5.6, qu'avec les quatre algorithmes, l'énergie consommée augmente avec la densification du réseau. L'augmentation de la quantité de l'énergie consommée avec la densification est attendue car en augmentant la portée de transmission d'un capteur, on augmente le nombre de capteurs dans son voisinage ce qui

conduit à l'augmentation du nombre de messages échangés entre les capteurs (dont dépend l'énergie consommée en émission et en réception) et la distance séparant ces capteurs (dont dépend l'énergie consommée en émission).

Le gain énergétique de notre protocole avec ses deux variantes est visible sur la figure 5.6 et est nettement meilleur qu'avec les protocoles (BLAC-bg et BLAC-bs). Ceci est dû à la diminution du nombre de messages qui transitent dans le réseau grâce à la stratégie de coopération adoptées. Concernant BLAC-bs-MIMO et BLAC-bg-MIMO, on observe que ce dernier présente de meilleures performances que BLAC-bs-MIMO en termes d'énergie consommée. Cela est dû au nombre de clusters formés par BLAC-bs-MIMO qui est inférieur à BLAC-bg-MIMO, ce dernier crée donc un nombre de nœuds coopératifs supérieur à BLAC-bs-MIMO (comme le montre la figure 5.6), ce qui implique, en toute évidence, une consommation d'énergie moindre pour BLAC-bg-MIMO.

5.5.6 Probabilité de réception des données

La fiabilité d'un protocole est sans nul doute un point très important. Pour ce fait, nous allons évaluer la probabilité du nombre de paquets reçues avec notre protocole BLAC-MIMO avec ses deux variantes (BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO) en le comparant avec BLAC-bg, BLAC-bs.

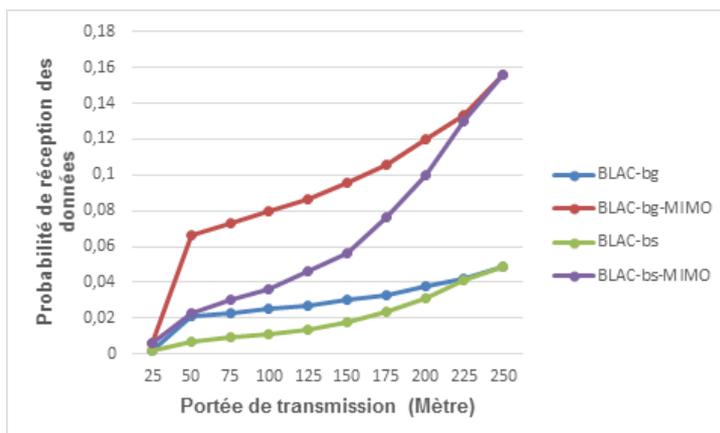


FIGURE 5.7 – Variation de la probabilité de réception de données en fonction de la portée des capteurs.

La figure 5.7 montre clairement la différence entre les résultats obtenus avec BLAC-bg, BLAC-bs, BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO. En effet, la probabilité qu'une réception soit effectuée pour les deux variantes de notre protocole (BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO) est plus élevée qu'avec les protocoles BLAC-bg, BLAC-bs. Ceci est dû à la sélection du nombre des nœuds coopératifs qui augmente la chance de transmettre les données vers la station de base de façon considérable. En remarque également, qu'avec la variante BLAC-bg-MIMO, nous détenons une probabilité de réception de données plus importante qu'avec BLAC-bs-MIMO lorsque la portée de transmission des capteurs varie entre 25 et 255 mètres, cela s'explique par le fait que la variante BLAC-bg-MIMO forme un nombre de nœuds coopératifs plus élevé, ce qui augmente la chance de transmission des données vers la station de base. Au-delà de 225 mètres la probabilité devient la même.

5.5.7 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude comparative. Cette étude concerne le protocole de routage hiérarchique BLAC avec ces deux variantes (BLAC-bg et BLAC-bs) ainsi que l'algorithme de clusterisation VCA et notre protocole BLAC-MIMO avec ces deux

variantes (BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO), et cela dans le but de démontrer l'apport de ces derniers, entre autres, en termes d'efficacité énergétique et de taux de réception.

Les résultats de simulation montrent que notre protocole de routage hiérarchique permet d'entrevoir un gain d'énergie et par conséquent augmente la durée de vie du réseau, l'objectif est donc atteint. Ceci est dû à la stratégie de coopération adoptée visant à une meilleure transmission de données avec une consommation d'énergie réduite par une sélection de nœuds coopératifs, ce qui prolonge la durée de vie des nœuds et garantit la stabilité du réseau.

Conclusion générale

Un nœud capteur est conçu pour être capable de fonctionner durant des mois, voire même des années selon le type d'application. Pour cela la source d'énergie doit être utilisée de manière rationnelle afin de prolonger la durée de vie du nœud capteur et de garder ainsi intacte la connectivité du RCSF. Ce critère lié à l'énergie des nœuds doit donc être pris en compte. Par conséquent, les concepteurs de ce type de réseau doivent faire face à un tel défi. Pour ce faire, l'une des solutions communément utilisées pour le routage dans les réseaux de capteurs sans fil est l'utilisation d'une architecture hiérarchisée appelée encore le clustering. Chaque unité d'un nœud capteur (acquisition, traitement et communication) est fortement liée à la consommation de l'énergie à des proportions différentes, en effet on estime que la transmission de données d'un capteur représente environ 70% de sa consommation d'énergie. C'est pour cela d'ailleurs que plusieurs autres travaux ont été établis dans la direction d'émetteur/récepteur cherchant à fournir de meilleurs gains énergétiques. La technologie MIMO est l'une des techniques de transmission/réception de données jugée performante en termes d'optimisation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil. Les caractéristiques des réseaux de capteurs, tel que la densité importante des nœuds, leurs autonomies énergétiques limitées et la topologie qu'ils forment, exigent

des protocoles de routage spécifiques.

Dans ce mémoire, dans le but de réduire la consommation d'énergie et ainsi réaliser un meilleur gain énergétique, nous avons proposé les protocoles de routages nommés BLAC-bg-MIMO et BLAC-bs-MIMO qui est le résultat d'une hybridation d'un protocole de routage hiérarchique (BLAC) avec ses deux version BLAC-bg et BLAC-bs pour la formation des clusters et l'élection des Cluster-Heads, et la technique MIMO (2×2) coopérative qui est le mode de communication le plus approprié permettant d'acheminer les informations vers la station de base.

Les deux approches proposées ont été validée par simulation. D'une part, au vu des performances obtenues par simulation, en montrant une augmentation considérable de la probabilité de réception des paquets, d'autre part en montrant un meilleur gain énergétique grâce à la stratégie adoptée. Nos travaux futurs seront axés sur la réalisation des simulations de nos protocoles avec un simulateur comme JSIM, OMNET++, WSNET, etc tout en les comparant avec d'autres protocoles de routage. Des simulations seront effectués avec des topologies variées et réalistes. Nous rechercherons aussi des méthodes de routage adaptées et efficaces dans cette topologie de réseau.

Bibliographie

- [1] : A. EZREIK, A. GHERYANI. Design and Simulation of Wireless Network using NS-2. 2nd International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT'2012), Singapore, 2012.
- [2] : A.IRFAN, P.MUGEN, W.WENBO. Uniform Energy Consumption through Adaptive Optimal Selection of Cooperative MIMO Schemes in Wireless Sensor Networks. Wireless Signal Processing and Network Lab, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, Chine, 2008.
- [3] : A. J. VITERBI. Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm. IEEE Transactions on Information Theory, vol. 13, no. 2, pp.260-269, 1967.
- [4] : A.KORA. Architectures de systèmes multi-antennes et estimation de canal. Thèse de doctorat en Télécommunications, Université de Limoges, France, 2007.
- [5] : A. MANJESHWAR and D. P. AGRAWAL. TEEN : A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. Proceedings of the International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, 2001.
- [6] : A. MAURITS, G. V. MONTFORT, G. V. WERRD. OMNeT++ Extensions and Examples. Technical report, Technical University of Budapest, Dept. of Telecommu-

- nications, 1995.
- [7] : C.DURAN-FAUDEZ. Transmission d'images sur les réseaux de capteurs sans fil sous la contrainte de l'énergie. Thèse de doctorat en Traitement du Signal et Génie Informatique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2009.
- [8] : C.O.ERNEHOLM. Simulation of the Flocking Behavior of Birds with the Boids Algorithm. Royal Institute of Technology School of Computer Science and Communication, Stockholm, Sweden 2011.
- [9] : C. TANG and C.S. RAGHAVENDRA. Compression techniques for wireless sensor networks. Chapter 10 in Wireless Sensor Networks, Kluwer Academic Publishers, pp. 207-231, Boston, USA, 2004.
- [10] : C. T. KONE. Conception de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil de grande dimension. Thèse de doctorat en informatique, Spécialité : Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique, l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2011.
- [11] : D. GAY, P. LEVIS, R. VON BEHREN, M. WELSH, E. BREWER, D. CULLER. The nesC Language : A Holistic Approach to Networked Embedded Systems. Electrical Engineering & Computer Sciences (EECS) Department, University of California, Berkeley, Etats-Unis, 2002.
- [12] : D. JIE, L. DAN-PU, W. HUA-RI. Energy efficiency of virtual MIMO transmission schemes for cluster-based wireless sensor networks .The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications 18(4) : 31-38, China, 2011.
- [13] : D.KARAKOOLAH. Conception et prototypage d'un récepteur itératif pour des systèmes de transmission MIMO avec pré-codage linéaire. Thèse de doctorat en Sciences pour l'Ingénieur, Université de Bretagne-Sud, France, 2009.

- [14] : D.SAPTONO. Conception d'un outil de prototypage rapide sur le FPGA pour des applications de traitement d'images. Thèse de doctorat en informatique, Spécialité : Instrumentation et Informatique de l'Image, université de bourgogne, France, 2011.
- [15] : D. SHIU, G. J. FOSCHINI, M. J. GANS, and J. M. KAHN. Fading correlation and its effect on the capacity of multi-element antenna systems. *IEEE Transactions on Communications*, 48(3) :502-513, March 2000.
- [16] : E.DHIB. Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de capteurs. Mémoire d'ingénieur en informatique, école supérieure des communications de TUNIS, 2007.
- [17] : E. FASOLO, M. ROSSI, J. WIDMER, and M. ZORZI. In-network aggregation techniques for wireless sensor networks : a survey, *Wireless Communications*, Vol. 14(2), pp.70-87, 2007.
- [18] : G. J. FOSCHINI and M. J. GANS. On limits of wireless communications in a fading environment when using mutiple antennas. Volume 6, pages 311-335, 1998.
- [19] : G.J.POTTIE, W.J.KAISER, Wireless integrated network sensors, *Communications of the ACM* 43, pp.551 -558, May 2000.
- [20] : G.CHALHOUB. Les réseaux de capteurs sans fil. Complexe scientifique des Cézeaux, université de Clermont-Ferrand, France, 2009.
- [21] : G. CHEN, J.BRANCH, M.J. PFLUG, L.ZHU, and B.K. SZYMANSKI. SENSE : A WIRELESS SENSOR NETWORK SIMULATOR. Department of Computer Science,Rensselaer Polytechnic Institute, New York,2004.
- [22] : G.KRAMER, M.GASTPAR, P.GUPTA. Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 3037-63. 2005.
- [23] : G. LYDIA GREETA ANANDHI, K.RAJESWARI, Dr. M. A. BHAGYAVENI. Co-opératif node selection for virtual MIMO in wireless sensor networks ; *International*

- Journal of Technology and Engineering System (IJTES), gopalax-Publisher of International Journals ISSN : 0976-1345 pp. 38-41, India 2012.
- [24] : G. REKAYA-BEN OTHMAN. Nouvelles constructions algébriques de codes spatio-temporels atteignant le compromis "multiplexage-diversité". Thèse de doctorat en électronique et communications, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris, France, 2004.
- [25] : G. SIMON, A. LEDEZCZI, and M. MAROTI. Sensor network-based countersniper system. SenSys 04, Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, Institute for Software Integrated Systems Vanderbilt University, USA, 2004.
- [26] : H. BALDUSs, K. KLABUNDE, and G. MUESCH. Reliable set-up of medical body-sensor networks. In European Conference on Wireless Sensor Networks, Germany, 2004.
- [27] : I. F.AKYILDIZ, W.SU, Y.SANKARASUBRAMANIAM, and E.CAYIRCI. Wireless sensor networks : a survey, Computer Networks. The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, v.38 n.4, pp.393-422, 2002.
- [28] : I. STOJMENOVIC and X. LIN. Power-Aware Localized Routing in Wireless Networks. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 12(11), pp.1122-1133, 2001.
- [29] : J. GOMEZ, A.T. CAMPBELL, M. NAGHSHINEH, and C. BISDIKIAN. Power-Aware Routing in Wireless Packet Networks. Proc. of the IEEE Int'l Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC), pp. 380-383, San Diego, CA , USA, November 15-17, 1999.

- [30] : J.H. CHANG and L. TASSIULAS, Energy Conserving Routing in Wireless Ad-Hoc Networks. Proc. of the 19th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Vol. 1, pp. 22-31, Tel Aviv, Israel, March 26-30, 2000.
- [31] : J.H. CHANG and L. TASSIULAS. Routing for Maximum System Lifetime in Wireless Ad-Hoc Networks. Proc. of the 37th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, pp. 67-71, Monticello, IL, September 22-24, 1999.
- [32] : J. CHEN, R. LIN, Y. Li, and Y. SUN. LQER : A Link Quality Estimation based Routing for Wireless Sensor Networks. IEEE Sensors, Vol. 8(2), pp. 1025-1038, 2008.
- [33] : J. HART and K. MARTINEZ. Environmental sensor networks : A revolution in the earth system science. In Elsevier, School of Electronics and Computer Science, University of Southampton, Southampton, 2006.
- [34] : J. LETESSIER. Performances théoriques de systèmes MIMO pré-égalisés et applications avec un simulateur de propagation 3D. Thèse de doctorat en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication : Communications Numériques, université de Bretagne Occidentale, France, 2005.
- [35] : J. NUEVO. A Comprehensible GloMoSim Tutorial. Institut national de recherche et de sécurité (INRS), Université du Québec, Québec, 2004.
- [36] : J. S. RELLEMEYER "TinyOS". Seminar of Distributed Systems, Department of Computer Science, ETH Zurich, Allemagne, 2004.
- [37] : J. VAUDOUR. Élaboration de couches MAC et réseau pour un réseau de capteurs. Mémoire d'ingénieur I.I.E (Institut d'Informatique et d'Entreprise) d'Evry, France, 2006.
- [38] : K.BAOQIANG, L.ZHAO, J.FAN?J.WANG. Optimal Design of Virtual MIMO for WSN Performance Improvement. WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICA-

- TIONS, ISSN : 1109-2742, Issue 4, Volume 10, April 2011.
- [39] : K.BEYDOUN. Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les RCSFs. Thèse de Doctorat en informatique, Université de FRANCHE COMTE, France, 2009.
- [40] : K.HEURTEFEUX. Protocoles localisés pour les réseaux de capteurs. Thèse de doctorat en Mathématique et Informatique, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2009.
- [41] : K.KAUSHLENDRA, J.ANKIT, D.RAHUL. The Energy Efficient Cooperative MIMO Technique for Hierarchical Clustering Protocol. International Journal of Computer Applications (0975 - 8887) Volume 57- No.9, India, 2012.
- [42] : L.KHELLADI, N.BADACHE. Les réseaux de capteurs : état de l'art. Rapport de recherche, laboratoire des Systèmes informatiques, USTHB, Alger, 2004.
- [43] : M.AISSANI. Optimisation du routage dans les réseaux de capteurs pour les applications temps-réel. Thèse de doctorat en Informatique Mobile, Université de Paris-Est, France, 2011.
- [44] : M. BAGHDADI. Gestion de la mobilité dans un réseau de senseurs sans fil. Mémoire de fin d'études, Ingénieurs en Télécommunications : Réseaux mobiles, école supérieur des communications de tunis, Tunisie, 2005.
- [45] : M.BEN ZID. Emploi de techniques de traitement de signal MIMO pour des applications dédiées réseaux de capteurs sans fil. Thèse de doctorat en Signal, Image, Parole, Télécoms, Université de Grenoble, France, 2012.
- [46] : M.CARTON. Vers une plate-forme efficace en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. Thèse de doctorat en Traitement du Signal et Télécommunication : Université de RENNES 1, France, 2006.

- [47] : M.E.M.DIOURI. Réseaux de capteurs sans fil : routage et sécurité. Mémoire d'ingénieur en informatique : Université de l'INSA de Lyon, France, 2010.
- [48] : 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.
- [49] : M.LEHSAINI. Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique. Thèse de doctorat en Réseaux, Université de Franche-Comté, France, 2009.
- [50] : M.MESSAI. Sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil. Mémoire de magistère en informatique : Réseaux et systèmes distribués, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, 2008.
- [51] : M. NAKAGAMI. The m-distribution- a General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading. *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, pp. 3-36, 1960.
- [52] : M. QIN and R. ZIMMERMANN. VCA : An energy-efficient voting-based clustering algorithm for sensor networks. *Journal of Universal Computer Science*, 13(1) : 87-109, 2007.
- [53] : M. S. E. W. PAMBA CAPO-CHICHI. Conception d'une architecture hiérarchique de réseau de capteurs pour le stockage et la compression de données. Thèse de doctorat en informatique : Université de DE FRANCHE-COMTÉ, France, 2010.
- [54] : M. SHAPIRO, Y. GOURHANT, S. HABERT, L. MOSSERI, M. RUFFIN, C. VALLOT. SOS : An Object-Oriented Operating System Assessment and Perspectives, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), France ,1991.

- [55] : N.HADJTAIEB. Conception et développement d'une application de surveillance de l'environnement à base d'un réseau de capteurs sans fil. Mémoire d'ingénieur en informatique : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie, 2011.
- [56] : 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.
- [57] : N. NIKAEIN, H. LABIOD, and C. BONNET. DDR-distributed dynamic routing algorithm for mobile ad hoc networks. In First Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing, pages 19 -27, 2000.
- [58] : N. MITTON, A. BUSSON, and E. FLEURY. Self-organization in large scale ad hoc networks. In Mediterranean ad hoc Networking Workshop, Bodrum Turkey, 2004.
- [59] : N.TIWARI, R.ANSHUMALI, P.PRATAP SINGH. Energy efficient virtual MIMO-based cooperation communication in wireless sensor networks. International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER), ISSN NO : 2250-3536 VOLUME 2, ISSUE 3, MAY 2012.
- [60] : O.BERDER. Optimisation et stratégies d'allocation de puissance des systèmes de transmission multi-antennes. Thèse de doctorat en électronique, Université de BRETAGNE OCCIDENTALE, France, 2002.
- [61] : P. F. DRIESSEN and G. J. FOSCHINI. On the capacity Formula for multiple-input multiple-output wireless channels : a geometric interpretation. IEEE Transactions on Communications, vol 47(2) :173-176, February 1999.
- [62] : P.LEVVIS, N.LEE, M.WELSH, D.CULLER. TOSSIM : Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications. University of California, Berkeley, California, 2003.

- [63] : P. LI, D. PAUL, R. NARASIMHAN, J. CIOF FI. On the Distribution of SINR for the mmse MIMO Receiver and Performance Analysis. *IEEE transactions on information theory*. VOL. 52, NO. 1, 2006.
- [64] : P.MARY. Etude analytique des performances des systèmes radio-mobiles en présence d'évanouissements et d'effet de masque. Thèse de doctorat en Images et Systèmes, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2008.
- [65] : Q.MUSTHAQ, F.JURASCHEK. Shawn A Customizable Sensor Network Simulator. Department of Mathematics and Computer Science, Institute of Computer Science, university of berlin, 2009.
- [66] : Q.TANGA, L. DENG, Y.QIN, X.LI, X.YUE. A Joint Energy-balanced Organizing Scheme with Hexagon-Clustered Algorithm and Cooperative MIMO for WSNs. *International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE)*, *Procedia Engineering* 29 (2012) 4330 - 4335, Chine, 2012.
- [67] : 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.
- [68] : R. PIECHOKI, P. FLETCHER, A. Nix, N. CANAGARAJAH, and J. MCGEEHAN. A measurement based feasibility study of space-frequency MIMO detection and decoding techniques for next generation wireless LANs. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 48(3) :732-737, August 2002.
- [69] : R.ZITOUNI. Routage à basse consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Mémoire de magistère en informatique : Réseaux et systèmes distribués, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, 2006.

- [70] : S.BOULFEKHAR. Approches de minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Mémoire de magistère en informatique : Réseaux et systèmes distribués, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, 2006.
- [71] : S.HUSSAIN, A.AZIM, J.HYUK PARK. Energy Efficient Virtual MIMO Communication for Wireless Sensor Networks. Springer Science Business Media, télécommunication système 42 : 139-149, Canada, 2009.
- [72] : S. K.JAYWEERA. V-BLAST-Based Virtual MIMO for Distributed Wireless Sensor Networks. IEEE Transactions on communications, vol. 55, no. 10, 2007.
- [73] : S. MADDEN, M. J. FRANKLIN, J. M. HELLERSTEIN, and W. HONG. TAG : a tiny aggregation service for ad-hoc sensor networks. Proc. of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI), pp. 131-146, Boston, MA, Dec. 9-11, 2002.
- [74] : S. M. ALAMOUTI. A simple Transmit diversity technique for wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 16(8) :1451-1458, 1998.
- [75] : T.BELLACHE, S.BENCHARIF. Stratégie MIMO coopérative pour l'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Mémoire de master en informatique : Réseaux et systèmes distribués, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, 2012.
- [76] : T.DUCROCQ, N.MITTON, M.HAUSPIE. Clustering pour l'optimisation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil. Université Lille 1, France, 2012.
- [77] : T. L. MARZETTA and B. M. HOCHWALD. Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh at fading. IEEE Transactions on Information Theory, vol. 45, pp. 139-157, January 1999.

- [78] : T.NGUYEN, O.BERDER, O.SENTIEYS. Optimisation énergétique des transmissions MIMO coopératives pour les réseaux de capteurs. IRISA Ecole Nationale Supérieure de Sciences Appliquées et de Technologie 5, rue Kérampont, 22305 LANNION Cedex, France, 2007.
- [79] : T. QUINIOU, A. AFFANDI, G. El ZEIN, and J. CIITERNE. Experiments on direction of arrival for indoor propagation channel at 1.8 GHz. In Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTCFall'99), volume 3, pages 1439-1443, Amsterdam, The Netherlands, September 19-22 1999.
- [80] : U. S. AITOR, S.SAVAZZI, U.SPAGNOLINI and C. IBARS. Virtual MIMO Channels in Cooperative Multi-hop Wireless Sensor Networks. Centre Tecnologic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), June 2004.
- [81] : V. LE NIR. Étude et optimisation des systèmes multi-antennes associés à des modulations multi porteuses. Thèse de doctorat en électronique, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, France, 2004.
- [82] : V. RODOPLU, T. H. MENG. Minimum Energy Mobile Wireless Networks. IEEE journal on selected areas in communications, vol.17, no.8, Department of Electrical Engineering, Stanford University, Stanford, USA, 1999.
- [83] : V. SHNAYDER, M. HEMPSTEAD, B. CHEN, G.W. ALLEN, and M. WELSH. Simulating the Power Consumption of Large-Scale Sensor Network Applications. Proc. of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), Baltimore, MD, pp. 188-200, November 2004.
- [84] : V. TAROKH, H. JAFARKHANI, and A. R. CALDERBANK. Space-time block codes from orthogonal designs. IEEE Transactions on Information Theory, 45(5) :1456-1467, July 1999.

- [85] : V. TAROKH, N. SESHARDI, and A. R. CALDERBANK. Space-time codes for high data rate wireless communication : performance criterion and code construction. IEEE Transactions on Information Theory, vol. 44, no. 2, pp. 744-765, March 1998.
- [86] : W. BECHKIT. Un nouveau protocole de routage avec conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Mémoire d'ingénieur en informatique : Systèmes Informatiques, Ecole nationale Supérieure d'Informatique (E.S.I), Algérie, 2009.
- [87] : W. HEINZELMAN, A.CHANDRAKASAN and H.BALAKRISHNAN. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks. Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3005-3014, 2000.
- [88] : Y. CHALLAL. Les réseaux de capteurs sans fil. Plateforme de cours UTS, France, 2008.
- [89] : Y. YOUNES. Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs. Thèse de magister en Informatique : Systèmes informatiques, université mouloud mammeri de tizi ouzou, Algérie, 2012.
- [90] : Y. YOUSEF. Routage pour la Gestion de l'Energie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil. Thèse de doctorat en Informatique, Université de Haute Alsace, France, 2010.
- [91] : Z. BOUZIDI, A.BENAMEUR. Mise en place d'un réseau de capteurs sans fil pour l'irrigation intelligente. Mémoire de master en informatique : Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, Algérie, 2012.
- [92] : 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.
- [93] : Y. ZATOUT. Conception et évaluation de performances d'un réseau de capteurs sans fil hétérogène pour une application domotique Thèse de doctorat en informatique :

Réseaux et Télécommunications, université de Toulouse, France, 2011.

Résumé

L'utilisation d'antennes multiples dans un système de communication remonte à quelques décennies. Dès lors que l'on dispose de plusieurs antennes en émission et en réception, nous sommes en présence d'un système dit MIMO, ce système permet d'exploiter trois types de gains, le premier est le gain en diversité, dont le but est l'augmentation de la qualité du lien radio où nous transmettons la même information plusieurs fois. Le deuxième type de gain est l'augmentation du débit, pour ce faire les canaux multiples sont utilisés comme un moyen de transmettre simultanément des données différentes et le troisième est le gain énergétique. Afin de réaliser un meilleur gain énergétique et une fiabilité de transmission, nous avons proposé deux variantes de protocole de routage BLAC-MIMO : protocole de routage nommé BLAC-bs-MIMO qui utilise la métrique densité et le protocole BLAC-bg-MIMO qui utilise la métrique degré. Tout deux adaptent la technique MIMO sur un protocole de routage hiérarchique BLAC avec ces deux versions (BLAC-bg et BLAC-bs) et qui consistent à élire deux nœuds coopératifs émetteurs dans le cluster émetteur et deux nœuds coopératifs récepteurs dans le cluster récepteur au lieu, d'un seul et cela pour que les deux nœuds coopératifs coopèrent pour former un système MIMO (2×2).

L'évaluation de performances de nos algorithmes montre qu'ils assurent une fiabilité de transmission avec une réduction considérable de l'énergie consommée, et par conséquent, ils augmentent la durée de vie du réseau.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil, Economie d'énergie, Système MIMO, Routage hiérarchique, Evaluation de performances, fiabilité de transmission.

Abstract

The use of multiple antennas in a communication system goes back to a few decades. Since one has several radiating-receiving antennae, we are in the presence of a system called MIMO, this system allows to exploit three types of profits, the first is the profit in diversity, of which the goal is the increase in the quality of the radio operator bond where we transmit same information several times. The second type of profit is the increase in the flow, with this intention the multiple channels are used like a means of transmitting different data simultaneously and the third is the energy profit. In order to carry out a better energy profit and a reliability of transmission, we proposed two alternatives of protocol of routing BLAC-MIMO : protocol of routing named BLAC-bs-MIMO which uses the metric density and the BLAC-bg-MIMO protocol which uses the metric degree. All two adapt technique MIMO on a hierarchical protocol of routing BLAC with these two versions (BLAC-bg and BLAC-bs) and which consist in electing two Nœuds cooperative transmitters in the transmitting cluster and two receiving co-operative nodes in the receiving cluster with the place, of only one and that so that the two co-operative nodes cooperate to form a system MIMO (2×2).

The performances evaluation of our algorithms shows that they ensure a reliability of transmission with a considerable reduction of the power consumption, and consequently, they increase the lifespan of the network.

Keywords : Networks of sensors without wire, energy Saving, System MIMO, hierarchical Routing, Evaluation of performances, reliability of transmission.