

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

Université A/MIRA-Béjaia
Faculté des sciences exactes
Département d'informatique

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master Professionnel en Informatique

Option : Administration et Sécurité des Réseaux



Thème

Strategies MIMO (Multiple input Multiple output) dans les
réseaux de capteurs sans fil

Présenté par :

RABHI Kahina
SEKKAI Chahinaz

Setenu devant le jury composé de :

Président : *M^r MIR Foudil*
Examinatrice : *M^{me} ALOUI Soraya*
Examinatrice : *M^{me} MOKTEFI Soraya*
Encadreur : *M^{me} KHAMTACHE Nadjjet*

28 septembre 2017

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos sentiments les plus profonds et notre reconnaissance à notre promotrice Madame KHAMTACHE pour la confiance qu'elle a su nous accorder. Ses orientations judicieuses, pour sa grande disponibilité, ses précieux conseils, ses encouragements et ses analyses qui ont guidé nos réflexions tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Nous remercions aussi *M^r* MIR de nous faire l'honneur d'accepter de présider le jury de notre soutenance.

Nous remercions également *M^{me}* ALOUI et *M^{me}* MOKTAFI d'avoir accepté de faire partie de notre jury de mémoire. À tous ces intervenants, nous présenterons notre respect et notre gratitude.

Dédicaces

Nous désirons tout d'abord remercier nos chers parents, nos chères sœurs et frères qui nous ont apporté leurs soutiens et qui nous ont encouragé tout le long de la réalisation de ce mémoire.

***SEKKAI Chahinez
RABHI Kahina***

Table des matières

Tables des matieres	iii
Tables des figures	iv
Liste des Acronymes	v
Introduction	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	2
1.1 Introduction	2
1.2 Description d'un capteur	2
1.2.1 Définition d'un capteur	2
1.2.2 Architecture d'un capteur	3
1.3 Description d'un réseau de capteurs sans fil	5
1.3.1 Définition d'un réseau de capteur sans fil	5
1.3.2 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil	5
1.3.3 Caractéristiques d'un réseau de capteurs	5
1.4 La communication dans les réseaux de capteurs sans fil	6
1.4.1 La pile protocolaire	6
1.4.2 Types de communication	8
1.5 Contraintes et facteurs conceptuelles des réseaux de capteurs	9
1.6 Domaine d'application	10
1.6.1 Applications militaires	10
1.6.2 Applications environnementales	11
1.6.3 Applications à la sécurité	11
1.6.4 Applications médicales	11
1.6.5 Applications commerciales	12
1.7 Conclusion	12
2 Généralités sur les stratégies MIMO	14
2.1 Introduction	14
2.2 Description de la technologie MIMO	14
2.3 Evolution de MIMO	15
2.3.1 SISO Single Input Single Output	15
2.3.2 MISO Multiple Input Single Output	15

2.3.3	SIMO Single Input Multiple Output	15
2.4	Notion de diversité	16
2.4.1	Diversité spatiale	16
2.4.2	Diversité de polarisation	16
2.4.3	Diversité temporelle	16
2.4.4	Diversité fréquentielle	16
2.5	Multiplexage spatial	18
2.5.1	Diagonale BLAST	18
2.5.2	Horizontale BLAST	18
2.5.3	Vertical BLAST	19
2.6	Les catégories de la technique MIMO	19
2.6.1	La diversité spatiale MIMO	19
2.6.2	le multiplexage spatial MIMO	20
2.6.3	Le MIMO-Beamforming	20
2.7	Technique de transmission MIMO	20
2.7.1	Codage spatio-temporel en treillis	20
2.7.2	Codage spatio-temporel par blocs	21
2.8	L'OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)	21
2.8.1	Principe et fonctionnement de l'OFDM	21
2.8.2	La combinaison MIMO-OFDM	21
2.9	Les systèmes MIMO	21
2.9.1	Système MIMO coopératifs pour les réseaux de capteurs sans fil	22
2.9.2	Système MIMO non coopératifs pour les réseaux de capteurs sans fil	23
2.10	Conclusion	23
3	Etat de l'art sur les MIMO dans les RCSFs	24
3.1	Introduction	24
3.2	Uniform energy consumption through adaptive optimal selection of cooperative MIMO schemes in wireless sensor networks	24
3.2.1	Les hypothèses	24
3.2.2	Solution proposée	25
3.2.3	Modèle de consommation d'énergie	25
3.2.4	Résultats de simulation	26
3.2.5	Discussion et critiques	27
3.3	The energy efficient cooperative MIMO technique for hierarchical clustering protocol	27
3.3.1	Solution proposée	28
3.3.2	La consommation d'énergie dans une communication MISO ou SISO :	29
3.3.3	Évaluation de performances	30
3.3.4	Discussion et critiques	30
3.4	A Joint Energy-balanced Organizing Scheme with Hexagon-Clustered Algorithm and Cooperative MIMO for WSNs	30
3.4.1	Solution proposée	31
3.5	Mobility aided cooperative MIMO transmission in wireless sensor networks	34
3.6	Adaptive communication and cooperative MIMO cluster formation for improved life time in wireless sensor networks	37
3.7	Efficient Clustering Technique for Cooperative Wireless Sensor Network	39
3.7.1	la solution proposée :	40
3.7.2	La formulation du problème	40

3.8	Massive MIMO Cooperative Communications for Wireless Sensor Networks : Through-put and Energy Efficiency Analysis	41
3.8.1	La solution proposée :	41
3.9	An Energy Efficient Cooperative Hierarchical MIMO Clustering Scheme for Wireless Sensor Networks	43
3.9.1	La solution proposée	44
3.9.2	Les étapes de l'algorithmes de clusterisations :	44
3.9.3	La phase de routage de données vers la station de base	44
3.9.4	Choix des clusters-head de routage	44
3.10	A Cooperative MIMO Framework for Wireless Sensor Networks	45
3.10.1	La solution proposée :	45
3.10.2	Les résultats de la simulation :	46
3.11	Etude comparative :	46
3.12	Conclusion	48
4	Simulation et analyse des résultats	49
4.1	Introduction	49
4.2	Choix du matlab	49
4.3	Etapas de la simulation	50
4.3.1	The Energy Efficient Cooperative MIMO Technique for Hierarchical Clustering Protocol	50
4.3.2	A Joint Energy-balanced Organizing Scheme with Hexagon- Clustered Algorithm and Cooperative MIMO for WSNs	52
4.3.3	Conclusion	53
	Conclusion générale	66
	Bibliographie	67

Table des figures

1.1	Capteur sans fil[21].	3
1.2	Anatomie d'un capteur.	3
1.3	Réseau de capteurs sans fil[24].	5
1.4	La pile protocolaire.	7
1.5	Exemple d'une application environnementale	11
1.6	Exemple d'une application médicale.	12
2.1	Le même signal est transmis sur plusieurs intervalles temporels.	17
2.2	Le même signal est transmis sur plusieurs intervalles fréquentiels.	17
2.3	Structure D-BLAST	18
2.4	Structure H-BLAST	19
2.5	Structure V-BLAST	19
2.6	Système MIMO coopératif pour les réseaux de capteurs sans fil.	22
3.1	Modèle de consommation d'énergie du cluster j	26
3.2	Scénario de la simulation.	27
3.3	Transmission de données vers la station de base.	29
3.4	Déploiement du réseau selon le modèle proposé.	32
3.5	(a) déploiement initiale, (b) Une paire des superviseurs prennent en charge un cluster et il sera localisé par la SB. Les superviseurs restants sont en mode veille.	34
3.6	(a) Collecte de données détectées. (b) Communication multi-saut en utilisant 2x1 et 2x2STBC.	35
3.7	Les étapes CO- MIMO de communications.	38
3.8	Protocole MIMO Massive	42
3.9	Tableau de comparaison	47
4.1	Déploiement aléatoire de 100 nœuds capteurs.	50
4.2	Election des CH et les nœuds coopératifs et création des clusters associés	51
4.3	Transmission de données vers la station de base	52
4.4	La durée de vie du réseau du protocole.	53

Liste des Acronymes

BLAST	B ell L aboratories L ayered S pace- T ime.
CH	C luster H ead.
D-BLAST	D agonal B ell L aboratories L ayered S pace- T ime.
GPS	G lobal P ositioning S ystem .
H-BLAST	H orizontal B ell L aboratories L ayered S pace- T ime.
ISO	I nternational S tandardization O rganisation.
IEEE	I nstitute of E lectrical and E lectronics E ngineers .
LEACH	L ow- E nergy A daptive C lustering H ierarchy.
LTE	L ong T erm E volution .
MAC	M edia A ccess C ontrol.
MIMO	M ultiple I nput M ultiple O utput.
MISO	M ultiple I nput S ingle O utput.
NesC	N etwork E mbedded S ystem C .
NS-3	N etwork S imulator 3 .
NC	N oeud C oopératif.
OFDM	O rthogonal F requency-division M ultiplexing.
OMNET++	O bjective M odular N etwork T est-bed in C++ .
OSI	O pen S ystems I nterconnection.
RCSF	R éseau de capteurs sans fil.
RCH	R outage C luster H ead.
SIMO	S ingle I nput M ultiple O utput.
SISO	S ingle I nput S ingle O utput.
SMP	S ensor M anagement P rotocol.
SNR	S ignal-to-noise R atio.
STBC	S pace T ime B lock C ode .
STC	S pace T ime C oding .
STTC	S pace T ime T rellis C ode .
SB	S tation de B ase .
TADAP	T ask A ssignment and D ata A dvertisement P rotocol .
TinyOs	T iny micro threading O perating S ystem .
TDMA	T ime D ivision M ultiple A ccess .

V-BLAST	V ertical B ell L aboratories L ayered S pace- T ime.
WiMax	W orld W ide I nteroperability for microwave access.

Introduction générale

Les réseaux de capteurs sans fil représentent une révolution technologique résultant de la convergence des systèmes de communication sans fil. Ces derniers ont connu un succès fulgurant au sein des communautés scientifiques et industrielles. De nos jours, les capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles parfois même inaccessibles à l'homme. Une fois déployés, ils collectent, enregistrent, traitent toute sorte de grandeurs physiques. Cependant, ces appareils miniatures et autonomes possèdent des ressources limitées, notamment en énergie. De plus, leur déploiement en milieu hostile rend difficile, toute intervention afin de recharger ou remplacer la batterie des capteurs.

La consommation d'énergie est fortement liée aux trois principales tâches accomplies par un nœud et qui sont : la capture, le traitement de données et la transmission. La transmission des données d'un capteur représente environ 70% de sa consommation d'énergie. C'est pour cela d'ailleurs que plusieurs techniques ont été établies pour la transmission/réception cherchant à fournir de meilleurs gains énergétiques, tel que, la technique MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Plusieurs limitations surgissent (contrainte d'énergie, capacité réduite des nœuds). Ces limitations motivent une grande partie des problématiques de recherche dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, en particulier la contrainte d'énergie qui est un problème fondamental. En effet, la technique MIMO se focalise sur la conservation d'énergie, la résolution des problèmes d'évanouissement et les interférences.

Les systèmes MIMO peuvent être exploités afin d'augmenter la capacité des systèmes de communication sans fil en utilisant plusieurs antennes à la fois en émission et en réception et permettant ainsi de réduire la consommation énergétique.

L'objectif de notre travail est de faire une étude comparative de quelques techniques MIMO appliquées aux réseaux de capteurs sans fils en terme de la consommation d'énergie.

Le reste du mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre présente des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Nous donnerons une vue générale sur les capteurs, ainsi que leurs caractéristiques. Nous présenterons également les contraintes de conception d'un réseau de capteurs et enfin ses domaines d'applications.

Le deuxième chapitre présente des généralités sur les techniques MIMO. Nous présenterons les notions de diversité, le multiplexage spatiale ainsi que les techniques de transmission MIMO.

Le troisième chapitre présente un état de l'art sur les stratégies MIMO proposées pour les RCSFs.

Le quatrième chapitre présente la simulation du protocole EB-LEACH-MIMO.

Nous clôturons notre mémoire par une conclusion générale résumant les grands points qui ont été abordés.

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Les développements récents des technologies des micro-capteurs et des communications sans fils ont engendré l'apparition des réseaux de capteurs sans fil. Un tel réseau est constitué d'un grand nombre de dispositifs physiques appelés capteurs ou nœuds capables de relever, de traiter et de transmettre des informations de l'environnement, dans lequel ils sont déployés. Dans ce chapitre, nous allons faire une description des réseaux de capteurs sans fil, leur architecture et leurs caractéristiques. Ensuite, nous présenterons leurs domaines d'application ainsi que les facteurs et contraintes de ce type de réseau.

1.2 Description d'un capteur

1.2.1 Définition d'un capteur

Les capteurs sont des dispositifs de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées, autonomes, capables de traiter des informations et de les transmettre, via des ondes radio, à une autre entité (capteurs) sur une distance limitée à quelques mètres[21].

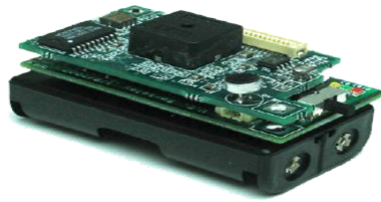


FIGURE 1.1 – Capteur sans fil[21].

1.2.2 Architecture d'un capteur

a.Architecture matérielle

Suivant le type d'application, il existe une multitude de capteurs sur le marché : les capteurs de température, d'humidité, de pression, ect. Cependant, malgré cette diversité apparente, ils restent dotés d'une architecture matérielle similaire. Un capteur est composé de trois unités principales : l'unité d'acquisition ou l'unité de capture, l'unité de traitement et l'unité de transmission ou de communication [1]. Il y a d'autres composants pouvant être ajoutés à un nœud capteur, comme un système de localisation (Global Positioning System (GPS)), un composant de mobilité ou aussi un générateur d'énergie (batteries rechargeables), etc.

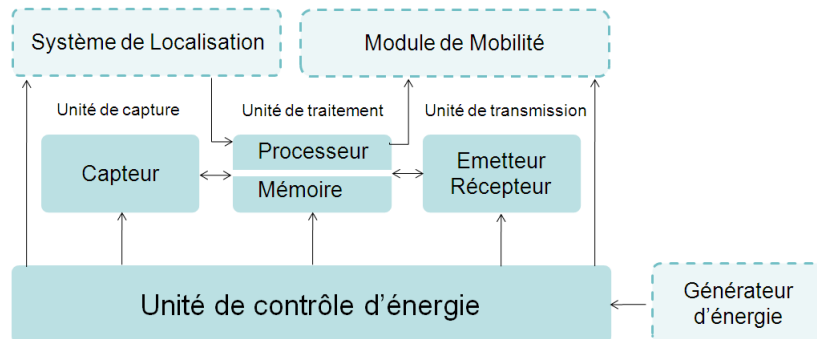


FIGURE 1.2 – Anatomie d'un noeud capteur.

-Unité de capture (Sensing Unit) : L'unité de capture est chargée de capturer des données relatives à l'environnement où le capteur est physiquement placé, c'est à dire qu'un capteur peut mesurer des valeurs relatives à son environnement et les

convertir en signaux électriques à l'aide d'un convertisseur Analogique / Numérique.

-Unité de traitement (Processing Unit) : L'unité de traitement est chargée d'effectuer un traitement sur les données récupérées, soit par un système matériel (processeur) ou logiciel (système d'exploitation).

-Unité de transmission (Communication Unit) : L'unité de transmission est chargée d'échanger des données avec d'autres dispositifs, il s'agit des émissions et réceptions de données via un support de communication radio.

-Unité de contrôle d'énergie : Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique (généralement une batterie). Étant donné sa petite taille, cette ressource énergétique est limitée et généralement non-remplaçable. Ceci fait souvent de l'énergie la ressource la plus précieuse d'un réseau de capteurs, car elle influe directement sur la durée de vie des micro-capteurs et donc du réseau entier. L'unité de contrôle d'énergie constitue donc une partie essentielle du système. Elle doit répartir l'énergie disponible aux autres modules, de manière optimale (par exemple en réduisant les dépenses inutiles et en mettant en veille les composants inactifs). Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement via des cellules solaires [2].

-Système de localisation : Dans plusieurs applications, les tâches de détection et les techniques de routage ont besoin de connaître la localisation géographique d'un nœud. Ainsi, il est commun qu'un nœud soit équipé d'un système de localisation géographique. Ce système peut se composer d'un module GPS pour un nœud de haut niveau ou bien d'un module software qui implémente des algorithmes de localisation qui fournissent les informations sur l'emplacement du nœud par des calculs distribués [26].

-Module de mobilité : Un mobilisateur peut parfois être nécessaire pour déplacer un nœud pour accomplir ses tâches. Le support de mobilité exige des ressources énergétiques étendues qui devraient être fournies efficacement. Le mobilisateur peut, également, opérer dans l'interaction étroite avec l'unité de détection et le processeur pour contrôler les mouvements du nœud [26].

b. Architecture logicielle

Pour que les capteurs puissent supporter différentes opérations, des techniques « Open Source » se sont associées au succès avéré des RCSFs. 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[22], MOS[23],ect.

TinyOS est le système d'exploitation le plus répandu,il est dédié pour les réseaux de capteurs sans fil. 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 consommation sans fil entre interfaces physiques [3]. Ainsi, lorsqu'aucune tâche n'est effectuée , le capteur se met automatiquement en veille.Le système, les bibliothèques et les applications de TinyOS ont été programmés en langage NesC (langage orienté composant syntaxiquement proche du C) 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 des systèmes sont gérées par une horloge.

1.3 Description d'un réseau de capteurs sans fil

1.3.1 Définition d'un réseau de capteur

Un RCSF est composé d'une multitude de noeuds capteurs spatialement répartis qui travaillent en collaboration via des liaisons sans fil pour communiquer (en mode Ad-Hoc) des informations recueillies sur les zones surveillées.

1.3.2 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteur sans fil consiste en un grand nombre de micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils sont dispersés aléatoirement à travers une zone géographique appelée zone de captage, ou zone d'intérêt, afin de surveiller un phénomène physique et de récolter leurs données d'une manière autonome.

Les nœuds capteurs utilisent une communication sans fil pour acheminer les données captées vers un nœud collecteur appelé nœud puits ou station de base. Le puits transmet ensuite ces données par internet ou par satellite à l'ordinateur central « Gestionnaire de tâches » pour analyser ces données et prendre des décisions. Ainsi, l'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises, puis récolter les données environnementales captées par le biais du nœud puit, comme l'illustre la figure ci-dessous.

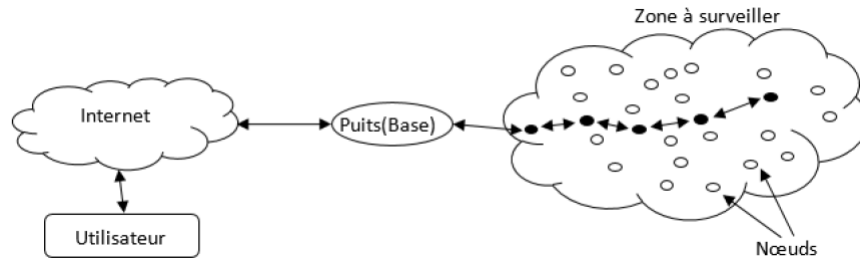


FIGURE 1.3 – Réseau de capteurs sans fil[24].

En plus des nœuds capteurs, le modèle peut introduire les super-nœuds, appelées des passerelles (Gateways). Ces derniers possèdent une source d'énergie importante, la capacité de traitement et de stockage est plus élevée comparativement aux nœuds capteurs.

Ils peuvent ainsi être utilisés pour exécuter des tâches plus complexes comme la fusion des données issues des capteurs d'une même zone. Dans le cas le plus simple, les nœuds capteurs seront dans le voisinage direct du puits. Cependant, dans le cas d'un réseau à grande échelle, ils ne sont pas tous dans le voisinage du puits et les données seront acheminées du nœud source vers le puits en transitant par plusieurs noeuds [1].

1.3.3 Caractéristiques d'un réseau de capteurs

Les réseaux de capteurs présentent des caractéristiques intrinsèques au niveau des nœuds capteurs (énergie, portée de transmission et puissance de stockage et de traitement...) et au niveau du réseau de capteurs sans fil formé par ces nœuds capteurs (Bande passante, déploiement, type de réseau et topologie dynamique...). Les caractéristiques d'un RCSFs sont décrites comme suit :

-Faible coût : dans le RCSF des milliers de capteurs sont déployés pour mesurer l'environnement. Afin de réduire le coût global de l'ensemble,le coût du nœud capteur doit être maintenu aussi bas que possible.

-L'énergie limitée : Les nœuds capteurs utilisent des batteries de taille minuscule comme ressources en énergie, ce qui limite leur durée de vie. La spécificité des applications des RCSFs (militaires, sismiques et autres) fait que la recharge ou le remplacement de ces batteries est une tâche difficile ou presque impossible. Ainsi, la méthode de gestion de consommation d'énergie constitue une contrainte

majeure dans ce type de réseau [4].

-Puissance de calcul : Malgré les progrès récents dans la fabrication de capteurs de plus en plus puissants, les capteurs actuels souffrent d'un manque de puissance de calcul (par exemple seulement 16 Mhz de puissance et 128Koctets de mémoire programmable pour un capteur MicaZ) .

Cette faible puissance ne permet pas d'utiliser des algorithmes complexes dans les réseaux de capteurs sans fil, et particulièrement dans la cryptographie poussée. De plus la vocation des capteurs sans fil est d'être en très grand nombre et leur utilisation dans des applications avec un nombre de nœuds élevé nécessite l'utilisation de capteurs bons marchés, ce qui impliquent des capteurs avec une puissance de calcul très faible.

La faiblesse de la puissance de calcul est aussi préjudiciable pour le temps de réponse du réseau. Si l'on demande à un capteur d'effectuer de nombreux calculs, sa réactivité va sensiblement se détériorer [5].

-Sécurité et confidentialité : D'un point de vue de sécurité, la probabilité de détection d'une communication entre capteurs doit être réduite au minimum (la raison est évidente dans un contexte d'utilisation militaire) et le capteur doit être protégé contre les intrusions ou les perturbations affectant son comportement.

-Détection et traitement distribués : le grand nombre de nœuds capteurs est distribué de façon uniforme ou aléatoire. Dans un RCSF chaque nœud est capable de collecter, trier, traiter, agréger et envoyer les données. Par conséquent, la détection fournit la robustesse du système

-Auto-organisation : L'auto-organisation s'avère très nécessaire pour ce type de réseau afin de garantir sa maintenance. Vu les différentes raisons résultants une topologie instable du réseau de capteurs, ce dernier devra être capable de s'auto-organiser pour continuer à assurer ses applications.

1.4 La communication dans les réseaux de capteurs sans fil

1.4.1 La pile protocolaire

La volonté de ne pas favoriser un industriel, la prise en compte de l'hétérogénéité des équipements, et la possibilité d'une évolution et d'une adaptation facile ont nécessité l'adoption de règles communes de communication et de coopération entre les équipements. Ces règles forment un protocole de communication. Aupa-

ravant la pile protocolaire utilisée dans le monde des réseaux est organisée suivant un modèle en couches superposées l'une sur l'autre. Chaque couche assure de manière indépendante une partie des fonctionnalités nécessaires à la communication entre les entités du réseau. Elle utilise les services des couches inférieures et en fournit à celle de niveau supérieur.

A notre époque, les réseaux de capteurs exigent des nouvelles limitations pour la conception des protocoles de communication. Ces protocoles doivent prendre en compte des contraintes de conception propres aux réseaux de capteurs sans fil. Le modèle OSI (Open Systems Interconnexion) de l'ISO (International Standardization Organisation) ne suffit donc plus.

La pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée dans la figure suivante :

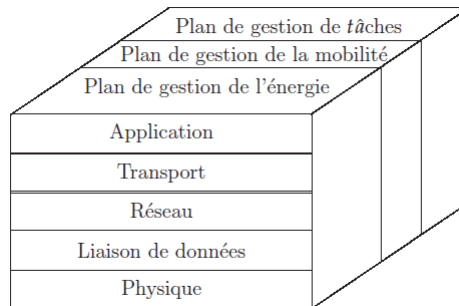


FIGURE 1.4 – La pile protocolaire.

Ce modèle comprend 5 couches (une couche application, une couche transport, couche réseau, une couche liaison de données, une couche physique) qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI, ainsi que 3 niveaux (plans) qui sont : un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches.

1-La Couche physique : Au niveau de la couche physique, la coopération se fait généralement en effectuant des constructions du signal par des transmissions simultanées du même signal via plusieurs nœuds. Cette technique est connue sous le nom de Space Time Coding(STC).

Ainsi, Elle permet de moduler les données et les acheminer dans le media physique tout en choisissant les bonnes fréquences.

Elle est responsable de la sélection de fréquence, la génération de la fréquence porteuse, la détection du signal, la modulation/démodulation et le cryptage/décryptage

des informations.

2-La Couche liaison de données : En générale, cette couche est responsable du multiplexage du flux de données, de la détection et le verrouillage des trames de données, du contrôle d'accès aux media (MAC : Media Access Control), du contrôle des erreurs, ... Elle assure la connexion fiable point à point ou point à multipoint selon la topologie du réseau de capteurs[1].

3-La Couche réseau : S'occupe du routage de données fournies par la couche transport.Elle établit les routes et une transmission fiable des données entre les nœuds capteurs et le nœud puits en optimisant l'utilisation de l'énergie des capteurs[4].

4-La couche transport : Cette couche est chargée du transport des données, le découpage en paquets, le contrôle de flux, la conservation de l'ordre des paquets et la gestion des éventuelles erreurs de transmission[28].

5-La couche application : La couche application constitue d'ensemble des applications implémentées sur un réseau de capteurs. Ces applications doivent fournir des mécanismes permettant à l'utilisateur d'interagir avec le réseau de capteurs à travers différentes interfaces, et éventuellement, par l'intermédiaire d'un réseau étendu (par exemple : l'internet). Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les protocoles. Parmi les protocoles d'application, nous citons : SMP (Sensor Management Protocol) et TADAP (Task Assignment and Data Advertisement Protocol)[1].

Quant aux niveaux intégrés dans la pile protocolaire, ils ont les fonctions suivantes :

-Le niveau de gestion d'énergie : Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs.

Dès lors, 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. De plus, 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[28].

-Le niveau de gestion de mobilité : Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, de manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final, 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[28].

-Le niveau de gestion des tâches : Lors d'une opération de capture dans une région donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme. Cela dépend essentiellement de la nature du capteur, son niveau d'énergie et la région dans laquelle il a été déployé. Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau[28].

1.4.2 Types de communication

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, les nœuds intermédiaires ont une portée de transmission très réduite, pour cela on utilise le routage multi-saut. Il existe quatre types de communication[25] :

a) Communication d'un nœud capteur avec un autre nœud capteur : C'est un type de communication directe qui est employée pour des opérations locales, tel que lors de l'organisation du réseau en structures cellulaires (clusterisation).

b) 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.

c) 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.

d) 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 consommations, dès lors, de nombreuses techniques d'optimisation sont proposées pour

minimiser la dépense d'énergie et augmenter la durée de vie du réseau.

1.5 Contraintes et facteurs conceptuelles des réseaux de capteurs

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit :

-L'environnement : Les capteurs interagissent avec l'environnement où ils mesurent leurs grandeurs physiques. De façon générale, ces mesures sont relevées à des instants relativement espacés dans le temps puis soudainement, soit pour des raisons de catastrophe ou d'événement exceptionnel, ils se mettent en mode de forte fréquence de mesures et envoient de l'information en rafale. Il faut alors préparer le réseau à supporter ce type d'événement rare mais largement consommateur de ressources et sujet à des situations de congestions et de difficultés majeures.

-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 provoqués par la panne des capteurs. Elle vise donc à minimiser l'influence de ces pannes sur la tâche globale du réseau.

-La scalabilité : Le nombre de nœuds capteurs déployés dans un RCSF peut être en centaines ou en milliers. Suivant l'application, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à atteindre des millions. Les nouveaux schémas doivent pouvoir garantir un bon fonctionnement avec ce nombre important de capteurs. Ils doivent aussi exploiter la nature fortement dense des réseaux de capteurs [31].

-Le coût de production : Si le coût d'un nœud capteur est tel que le déploiement d'un réseau est supérieur à celui d'un réseau composé de capteurs traditionnels, alors le réseau de capteurs sans fils 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 de réseaux de capteurs sans fil soit économiquement faisable.

- Agrégation de données : Dans les RCSF, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engen-

drer la réception par la station de base d'information redondante. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau ainsi d'améliorer sa durée de vie. L'une des techniques utilisées pour réduire la transmission d'informations redondantes est l'agrégation des données, appelée aussi fusion des données[30].

-Média de transmission : Les nœuds communicants sont reliés sans fil. Ce lien peut être réalisé par radio, signal infrarouge ou un média optique.

-Consommation énergétique : Les nœuds capteurs sans fil sont des composants microélectroniques, ils ne peuvent être équipés que par une source d'énergie limitée (<0.5 Ah, 1.2 V). Dans la plupart des cas, ces nœuds capteurs ne peuvent être rechargés. Par conséquent, leur durée de vie dépend fortement de la durée de vie de leurs batteries. Pour cela, les nœuds capteurs doivent bien gérer leur consommation d'énergie. Dans un réseau de capteurs multi-sauts, chaque nœud collecte des données et les transmet à la station de base, et joue également le rôle d'un routeur. Le dysfonctionnement de quelques nœuds entraîne un changement significatif de la topologie globale du réseau, et peut nécessiter un reroutage des paquets et une réorganisation du réseau. Toutes ces opérations consomment beaucoup d'énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les algorithmes et protocoles à faible consommation d'énergie. Dans les réseaux de capteurs, l'efficacité en consommation d'énergie représente une métrique de performance importante, qui influence directement sur la durée de vie du réseau dans sa globalité. Pour cela, les concepteurs peuvent, au moment du développement des protocoles, négliger les autres métriques de performances telles que la durée de transmission et le débit, au profit du facteur de consommation d'énergie [31].

1.6 Domaine d'application

Les propriétés des réseaux de capteurs sans fil leurs permettent d'envahir plusieurs domaines d'applications. En effet,ils permettent aussi d'étendre les applications existantes et de faciliter la conception d'autres systèmes tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage. Les réseaux de capteurs ont le potentiel de révolutionner la manière même de comprendre, de construire les systèmes physiques complexes et ils se révèlent très utiles dans de nombreuses applications lorsqu'il s'agit de collecter et de traiter des informations provenant de l'environnement. Les RCSFs peuvent offrir de meilleures contributions dans plusieurs domaines à savoir : Militaire, sécurité, environnemental, domestique, santé, etc. Des exemples d'applications potentielles dans ces différents domaines sont exposés ci-dessous[27].

1.6.1 Applications militaires

Comme dans le cas de plusieurs technologies, le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Les propriétés de RCSF comme le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes rendent ce type de réseaux efficace dans le domaine militaire. Ils peuvent être utilisés pour surveiller toutes les activités des forces ennemies comme la Surveillance des champs de bataille ; Reconnaissance des forces adverses et terrain ; Ciblage et Évaluation des dommages de la bataille soit nucléaires, biologiques ou chimiques ainsi que la détection d'attaques.

1.6.2 Applications environnementales

Ces réseaux peuvent être déployés dans des environnements hostiles comme les volcans, les sites de tremblements de terre, ou même dans les forêts, dans l'air, la mer etc. Ces capteurs ont pour but de recueillir diverses informations sur l'état du milieu naturel et sur les comportements de déplacement. Parmi les types de capteurs, il existe des thermo-capteurs qui peuvent être utilisés afin d'avertir un éventuel début d'incendie dans une forêt. Ceci peut permettre de lutter efficacement contre les feux de forêt. Dans les champs agricoles, il est possible d'identifier facilement les zones sèches et rendre l'irrigation efficace en utilisant la plantation des capteurs avec les graines. Sur les sites industriels, les centrales nucléaires ou dans les pétroliers, il est possible de déployer des capteurs pour détecter des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc) et alerter les utilisateurs dans un délai suffisamment court pour permettre une intervention efficace.

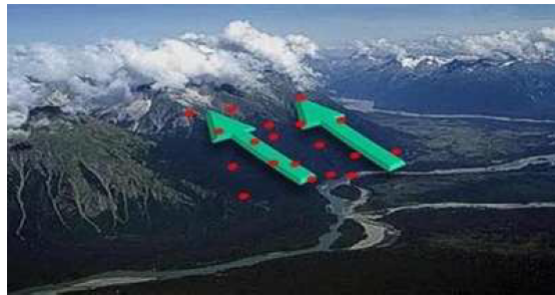


FIGURE 1.5 – Exemple d'une application environnementale

1.6.3 Applications à la sécurité

Au niveau de la sécurité des constructions, les capteurs peuvent être intégrés dans les murs ou le béton d'un bâtiment afin de détecter un séisme ou un vieillissement, sans alimentation électrique ou autres connexions filaires. Dans ce cas, les capteurs doivent fonctionner durant des années, voir des décennies. Ces capteurs peuvent être utilisés pour surveiller des voies ferrées afin de prévoir à l'avance des accidents. En outre, un réseau de capteurs de mouvements peut constituer un système d'alarme distribué qui servira à détecter les intrusions sur un large secteur. L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité pourrait diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et à la protection des êtres humains tout en garantissant de meilleurs résultats.

1.6.4 Applications médicales

Les réseaux de capteurs peuvent également être utiles dans le domaine de la médecine. Ils permettent de surveiller d'une manière permanente les patients et collecter des informations physiologiques afin de faciliter le diagnostic de quelques maladies. La surveillance des fonctions vitales de l'être humain est possible avec l'utilisation des micro-capteurs qui peuvent être avalés ou implantés sous la peau. Désormais, il est possible de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain avec une autonomie de 24 heures sans faire appel à la chirurgie. D'autres ambitieuses applications biomédicales sont aussi présentées, tel que la surveillance du niveau de glucose, le monitoring des organes vitaux ou la détection des cancers (figure 1.6).

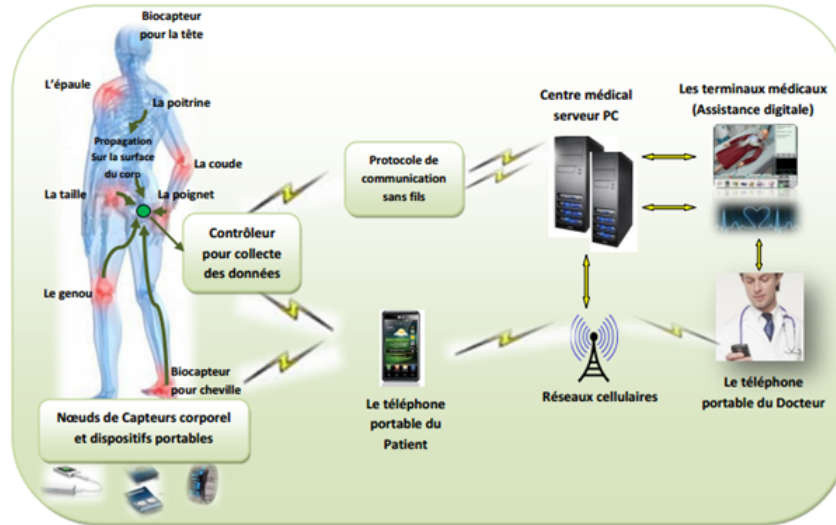


FIGURE 1.6 – Exemple d'une application médicale.

1.6.5 Applications commerciales

L'intégration des nœuds capteurs au processus de stockage et de livraison peut permettre à un client de connaître la position actuelle de la livraison de son paquet à tout moment. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettent de suivre à distance la fabrication des produits du début jusqu'à la fin. Dans les immeubles, le système de climatisation peut être conçu en intégrant plusieurs micro-capteurs dans les tuiles du plancher et les meubles. Ainsi, la climatisation pourra être déclenchée seulement aux endroits où il y a des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire.

Les réseaux de capteurs sans fil sont en train de vivre un développement continu guidé par l'intégration de l'Internet et des applications multimédias. Ceci implique non seulement une augmentation du débit mais aussi une garantie de la qualité de service

1.7 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ses applications : santé, environnement, industrie et même dans le domaine sportif.

Nous avons remarqué que plusieurs facteurs et contraintes influencent sur la gestion des RCSFs, ces derniers ont une capacité énergétique limitée ce qui rend sa consommation une tâche critique pour prolonger la durée de vie du réseau.

C'est pour cela que plusieurs travaux ont été établis pour fournir un meilleur gain énergétique. Il existe plusieurs techniques de transmission. Parmi elles, nous citons la technique MIMO (multiple input multiple output) qui s'avère la meilleur en terme de gain énergétique.

Dans le chapitre suivant, nous présenteront les différentes techniques MIMO, qui se présentent sous forme de systèmes MIMO coopératifs et non coopératifs pour les réseaux de capteurs sans fil.

Généralités sur les stratégies MIMO

2.1 Introduction

Avec la croissance fulgurante de l'utilisation des systèmes de communications sans fil, la majorité des travaux de recherche dans ce domaine se focalise sur le déploiement de nouvelles technologies permettant de rendre les réseaux sans fil de plus en plus performants. La conception des nouvelles générations de réseaux sans fil se trouve toujours confrontée au problème de limitation de capacité posé par une bande passante très étroite et une puissance d'émission souvent limitée. Afin de surmonter ces handicaps, une nouvelle technologie appelée communément MIMO (Multiple Input, Multiple Output) tente de tirer profit de la dimension spatiale, en installant plusieurs antennes au niveau des émetteurs et/ou des récepteurs. Ainsi, l'emploi d'une telle technologie fournit une augmentation considérable des débits des liens de transmission (en gardant la même largeur de bande et la même puissance). La technologie MIMO est considérée comme l'une des technologies récentes les plus innovatrices dans le monde des communications sans fil. Dans ce chapitre, nous présentons une description de la technologie MIMO et son évolution, puis nous présenterons les notions de la diversité, le multiplexage spatial ainsi que les différentes catégories du système MIMO.

2.2 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 ef-

ficacement 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 en énergie dans les réseaux de capteurs sans fil [6], [7].

2.3 Evolution de MIMO

2.3.1 SISO Single Input Single Output

Un système SISO est un système possédant une seule entrée et une seule sortie. Ce sont les systèmes les plus simples, ils sont qualifiés aussi de monovariabiles [10],[11].

La capacité du canal SISO est :

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 W} \right) \text{ bps} \quad (2.1)$$

Où :

P : la puissance du signal utile en Watt,

N_0 : la densité spectrale de puissance du bruit en W/Hz,

W : la bande passante donnée en Hz.

En normalisant la capacité par la bande utile W , on obtient :

$$C = W \cdot \log_2 (1 + \rho) \quad (2.2)$$

Avec ρ est le rapport signal sur bruit (P/N_0).

2.3.2 MISO Multiple Input Single Output

C'est une technique de diversité spatiale en émission. C'est-à-dire plusieurs antennes émettent des signaux qui sont interceptés par une seule antenne en réception [10],[11].

La capacité du canal MISO est donnée dans la formule suivante :

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + N_t \frac{P_i}{N_0 W} \right) = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 W} \right) \quad (2.3)$$

Où :

N_t : Le nombre d'antennes émettrices .

P_i :est la puissance émise sur chaque antenne.

En normalisant la capacité par la bande utile W , nous obtenons :

$$C = W \cdot \log_2 (1 + \rho) \quad (2.4)$$

2.3.3 SIMO Single Input Multiple Output

C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal [10] [11].

La capacité du canal SIMO est :

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + N_r^2 \frac{P}{N_0 W} \right) \quad (2.5)$$

Où :

N_r : le nombre d'antennes réceptrices.

En normalisant la capacité par la bande utile W , nous obtenons :

$$C = W \cdot \log_2 (1 + N_r^2 \rho) \quad (2.6)$$

Avec ρ est le rapport signal sur bruit.

2.4 Notion de diversité

La diversité est utilisée dans les systèmes de transmission pour combattre l'évanouissement à petite échelle causé par les trajets multiples. 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 que l'une de ces liaisons au moins ne subisse pas de fortes atténuations 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. Il existe quatre formes de diversité exploitée en transmissions numériques telles que la diversité temporelle, fréquentielle, spatiale et la diversité de polarisation [13].

2.4.1 Diversité spatiale

Cette dernière diversité est obtenue en utilisant plusieurs antennes pour émettre un signal ou des versions redondantes ou/et plusieurs antennes pour recevoir les différents signaux. Il s'agit d'avoir des trajets à évanouissement indépendants et, pour ce faire, les antennes ne doivent pas être trop proches pour que les signaux ne soient pas corrélés. Une distance de cohérence est déterminée et permet d'assurer la diversité spatiale. Celle-ci est liée à la hauteur de l'antenne d'une station de base [14].

2.4.2 Diversité de polarisation

Le principe est similaire aux précédentes, un même signal ou une réplique redondante est émis en utilisant des ondes polarisées différemment [15]. La solution la plus courante est l'utilisation de deux polarisations orthogonales comme verticale et horizontale par exemple. Il faut néanmoins que les caractéristiques de propagation des deux ondes soient différentes.

2.4.3 Diversité temporelle

Elle s'applique pour les canaux sélectifs en temps. La diversité 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 2.1). La diversité temporelle est généralement utilisée avec de l'entrelacement et du codage correcteur d'erreur. Le désavantage de la diversité temporelle est évidemment le retard induit par la diversité, ce qui réduit le débit de transmission.

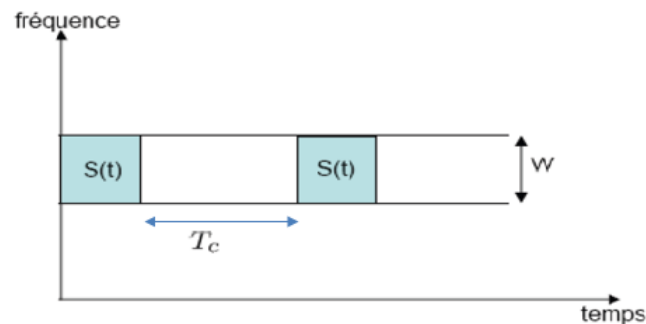


FIGURE 2.1 – Le même signal est transmis sur plusieurs intervalles temporels.

Où :

$S(t)$: est le signal transmis sur plusieurs intervalles temporels.

T_c : est le temps de cohérence du canal.

W : est la largeur de bande du signal.

2.4.4 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 [6], dont l'écartement fréquentiel est d'au moins la bande de

cohérence du canal B_c (figure 2.2).

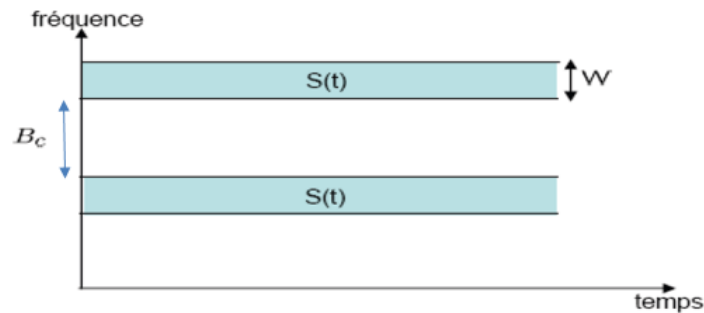


FIGURE 2.2 – Le même signal est transmis sur plusieurs intervalles fréquentiels.

Où :

$S(t)$: est le signal transmis sur plusieurs intervalles fréquentiels.

B_c : est la largeur de bande de cohérence du canal.

W : est la largeur de bande du signal.

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. Cette technique utilise 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 [16].

2.5 Multiplexage spatial

Le multiplexage spatial permet de maximiser le débit d'information sur un canal MIMO. Cette technique a été introduite sous le nom de BLAST (Bell Labs Layered Space-Time). Pour pouvoir être décodés, ces codes BLAST doivent utiliser au moins autant d'antennes en réception qu'en émission. Bien qu'il existe différentes versions, la version de ce premier système MIMO est appelé Diagonale BLAST. Par la suite Foschini et Wolniansky proposent deux schémas de codage appelés Vertical BLAST et Horizontale BLAST.

2.5.1 Diagonale BLAST

Chaque sous-trame d'information est répartie sur une diagonale espace-temps grâce à un entrelaceur espace-temps (figure 2.3). 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. L'avantage de ce système est qu'il exploite à la fois la diversité spatiale et temporelle.

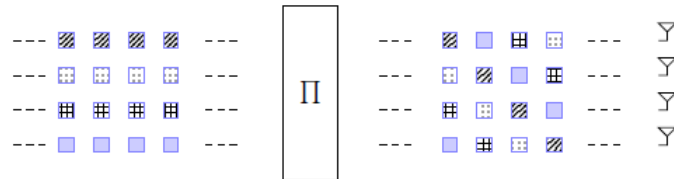


FIGURE 2.3 – Structure D-BLAST

2.5.2 Horizontale BLAST

Cette architecture horizontale découpe directement la trame d'information en sous trames puis chacune est codée indépendamment, après avoir été modulée chaque sous trame est transmise simultanément par une antenne émettrice (figure 2.4).



FIGURE 2.4 – Structure H-BLAST

2.5.3 Vertical 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.

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 [6].

Chaque symbole de la trame est transmis par une des antennes émettrices (figure 2.5). 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.

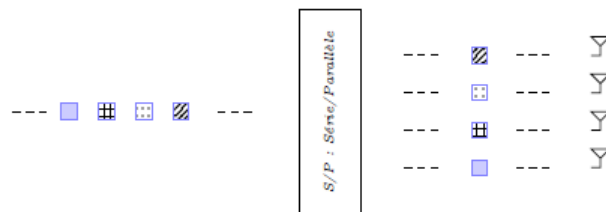


FIGURE 2.5 – Structure V-BLAST

2.6 Les catégories de la technique MIMO

Les techniques MIMO utilisent un réseau d'antennes à l'émission et à la réception afin d'améliorer la qualité du rapport signal sur bruit (Signal-to-noise ratio ou SNR en anglais) et / ou le débit de transmission. Ces techniques présentent de bonnes performances dans les canaux à trajets multiples, mais ces derniers provoquent aussi les problèmes des interférences entre les symboles transmis [9]. Les techniques MIMO mises en œuvre se divisent en trois catégories :

2.6.1 La diversité spatiale MIMO

La diversité spatiale consiste à envoyer le même flux de données simultanément sur les différentes antennes à l'émission. A la réception, plusieurs répliques du signal sont reçues sur chacune des antennes et sont combinées de façon cohérente. La diversité spatiale présente une bonne efficacité quand les sous-canaux MIMO sont décorrélés les uns des autres. De plus, quand le nombre d'antennes à l'émission augmente, la puissance du signal reçu à un instant donné augmente en améliorant la détection du signal.

2.6.2 le multiplexage spatial MIMO

Le multiplexage spatial consiste à transmettre les différents flux de données sur les différentes antennes d'émission afin d'augmenter les débits de transmission du système MIMO. La capacité de transmission d'un système de transmission est définie comme le débit de transmission maximum possible offrant une probabilité d'erreur très faible. Les signaux reçus sont décodés et combinés pour reformer le message transmis. Comme pour la diversité spatiale MIMO, les sous-canaux de propagation doivent être décorrélés.

2.6.3 Le MIMO-Beamforming

le réseau d'antenne MIMO est utilisé pour orienter et contrôler le faisceau d'onde radio (amplitude et phase du faisceau). Il est ainsi possible de créer des lobes constructifs / destructifs et optimiser une transmission entre l'émetteur et la cible. Les techniques de beamforming permettent à la fois d'étendre une couverture radio (d'une station de base ou d'un point d'accès par exemple) et de limiter les interférences entre utilisateurs et la pollution électromagnétique environnante (en ciblant le récepteur visé).

2.7 Technique de transmission MIMO

Les techniques MIMO sont employés pour exploiter la diversité d'émission et/ou pour augmenter le débit. Pour ce faire, un code espace-temps doit être mis en œuvre.

L'idée de base du codage espace-temps est de créer de la redondance ou de la corrélation entre symboles transmis sur les dimensions spatiale et temporelle. Un code espace-temps est caractérisé par son rendement, son ordre de diversité et son gain de codage. Le rendement du code espace-temps est égal au rapport entre le nombre de symboles émis et le nombre de durées symboles correspondant. L'ordre de diversité est égal au nombre de voies indépendantes à la réception. Enfin, le

gain de codage correspond au gain apporté par le système codé, en termes de performance, par rapport au système non-codé. Un code espace-temps est dit à rendement plein lorsque son rendement est égal au nombre d'antennes à l'émission. Nous distinguons deux grandes classes de codage espace-temps permettant l'exploitation de la diversité : le codage en treillis et le codage en blocs STBC.

2.7.1 Codage spatio-temporel en treillis

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. Il combine le codage de canal avec la modulation sur les antennes émettrices, et peut être considéré comme une extension des codes en treillis classiques au cas des antennes multiples à l'émission et à la réception. Le décodage se fait par l'algorithme de Viterbi [20] pour choisir le chemin le plus vraisemblable dans le treillis. Il est démontré dans [12] 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. Le Codage spatio-temporel en treillis crée des relations entre les signaux à la fois dans l'espace (plusieurs antennes émettrices) et dans le temps (symboles consécutifs). Le codeur est composé de polynômes générateurs qui déterminent les symboles émis simultanément. En contrepartie la complexité de décodage augmente exponentiellement avec le nombre d'antennes d'émission et l'ordre de modulation [6].

2.7.2 Codage spatio-temporel par blocs

Le codage espace-temps en bloc (en anglais Space-Time Bloc Coding) a été présenté, pour la première fois par Alamouti en 1998 . Cette approche prend avantage des phénomènes de propagations multi-trajets, dans le but d'améliorer l'efficacité spectrale des systèmes MIMO. Le principe consiste à introduire une redondance d'information entre deux antennes d'émission et améliorer ainsi la robustesse pour une même puissance d'émission mais sans gagner du débit. Alamouti a présenté son code avec, une configuration de deux antennes à l'émission avec une et deux antennes réceptrices respectivement. Le codage est fait en prenant en compte les dimensions spatiale et temporelle d'où son nom. Le code d'Alamouti n'est adapté qu'aux systèmes possédant deux antennes à l'émission[13].

2.8 L'OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

L'OFDM est un procédé de codage de signaux numériques par répartition en fréquences orthogonales sous forme de multiples sous-porteuses. Cette technique permet de lutter contre les canaux sélectifs en fréquence en permettant une égalisation de faible complexité. Ces canaux se manifestent notamment en présence de trajets multiples et sont d'autant plus pénalisants que le débit de transmission est élevé. C'est la raison pour laquelle on trouve cette technique largement adoptée dans la plupart des applications à très haut débit.

2.8.1 Principe et fonctionnement de l'OFDM

La modulation OFDM (multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence) est une technique qui divise la bande de fréquence en N sous-canaux (ou sous-porteuses) orthogonaux et uniformes [11] c'est-à-dire elle répartie les symboles sur un grand nombre de porteuses à bas débit, à l'opposé des systèmes conventionnels qui transmettent les symboles en série, chaque symbole occupant alors toute la bande passante disponible.

2.8.2 La combinaison MIMO-OFDM

Plusieurs paramètres décrivent la qualité d'une liaison de données sans fil, les paramètres fondamentaux sont la vitesse de transmission, la fiabilité de transmission et la portée d'émission. Par conséquent, la vitesse de transmission peut être augmentée en réduisant la portée de transmission et la fiabilité. Cependant, avec la combinaison de systèmes MIMO-OFDM, les trois paramètres fondamentaux peuvent être améliorés en même temps.

La technique MIMO peut être combinée avec n'importe quel type de modulation, mais les recherches récentes suggèrent que la combinaison entre les systèmes MIMO et les systèmes OFDM est la plus efficace.

La combinaison des techniques MIMO et OFDM a été adoptée dans les communications sans fil en raison des nombreux avantages de l'OFDM et des avantages des systèmes MIMO. A titre d'exemple, la technique MIMO-OFDM est utilisée dans la norme IEEE 802.11n [19] de communication sans fil pour augmenter la capacité du canal ainsi que dans la technique LTE [18] et WiMax [17].

2.9 Les systèmes MIMO

Les systèmes MIMO nécessitent moins d'énergie que les systèmes SISO pour pouvoir réaliser une transmission avec le même taux d'erreur binaire. 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 la consommation d'énergie est la contrainte la plus importante. 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.

C'est pour cela que les techniques de communications sont utilisées. Ces techniques se présentent sous forme de systèmes MIMO coopératifs et systèmes MIMO non coopératifs.

2.9.1 Système MIMO coopératifs pour les réseaux de capteurs sans fil

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 2.6).

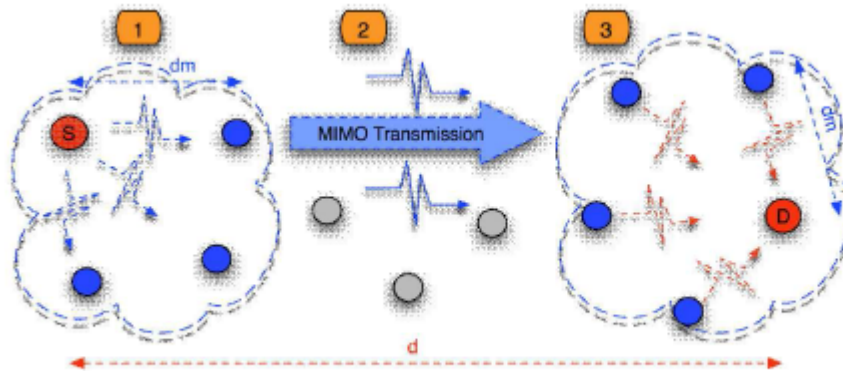


FIGURE 2.6 – Système MIMO coopératif pour les réseaux de capteurs sans fil.

Du côté émetteur, le nœud S peut coopérer avec ses voisins et échanger ses données (la distance entre 2 nœuds coopérant $d_m < d$). Des techniques MIMO, tels les codes spatio-temporels en blocs (STBC pour Space-Time Block Codes)

ou en treillis (STTC pour Space-Time Trellis Codes), ou encore le multiplexage spatial . . . , sont employées 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 informations respectives jusqu'au destinataire en vue de la recombinaison des signaux [8].

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 [4]. La destination combine les signaux issus de la source et des relais afin d'augmenter la résistance contre les fluctuations du canal.

2.9.2 Système MIMO non coopératifs pour les réseaux de capteurs sans fil

Les nouvelles technologies de transmission/réception de données comme les systèmes MIMO, augmentent la largeur de la bande de fréquence grâce au multiplexage spatial, et améliorent la fiabilité et la portée du lien sans-fil en exploitant le codage spatio-temporel et la directivité des antennes. Mais ,toutes ces améliorations sont réalisables au prix de plusieurs composants radiofréquences à l'émission et à la réception.Ces derniers communiquent entre eux 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 .

2.10 Conclusion

Les techniques de diversité s'avèrent très efficaces pour réduire l'impact des différents problèmes tels que la limitation de la bande fréquentielle du canal, les évanouissements et les trajets multiples sur les performances des systèmes. Ce chapitre donne une vue globale sur les systèmes MIMO dans les réseaux de capteurs sans fil qui ont comme objectif 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.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter un état de l'art sur les différentes stratégies MIMO proposées pour les réseaux de capteurs sans fils.

Etat de l'art sur les MIMO dans les RCSFs

3.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil se composent de nœuds capteurs équipés d'une batterie ayant une durée de vie limitée, ce qui rend les opérations du réseau disponibles uniquement dans un laps de temps limité. Il est essentiel d'examiner et d'estimer la durée de fonctionnement (la durée de vie) du réseau. Dans les RCSFs, de différentes techniques MIMO sont utilisées afin de réduire la consommation d'énergie et augmentée le débit.

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques stratégies MIMO employées dans les réseaux de capteurs sans fil les plus récentes et les plus optimales ainsi d'effectuer une étude comparative.

3.2 Uniform energy consumption through adaptive optimal selection of cooperative MIMO schemes in wireless sensor networks

Dans ce travail [35], un système MIMO coopératif basé sur une sélection adaptative des nœuds de coopération est proposé comme une solution pour le problème de consommation d'énergie non uniforme. Un schéma est proposé pour une répartition uniforme du réseau en clusters. 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 pour une consommation minimale d'énergie. En utilisant le système MIMO coopératif, les auteurs ont démontré que

la charge adaptative basée sur la sélection du nœud de coopération dans les clusters rend la consommation d'énergie uniforme dans le réseau de capteurs.

3.2.1 Les hypothèses

Les auteurs supposent que les nœuds capteurs sont synchronisés. Ils posent également l'hypothèse d'une synchronisation parfaite, une estimation parfaite des canaux et une détection de la vraisemblance maximale au niveau du récepteur.

3.2.2 Solution proposée

a) Côté émetteur :

Pour la transmission de données d'un nœud source S vers un nœud destinataire D sur une distance d , au lieu de la transmission directe SISO qui n'est pas pratique à une longue distance, le nœud S peut coopérer avec ses voisins et échanger ses données (la distance entre les nœuds de coopérations $d_c < d$). Quand un ou plusieurs nœuds de 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) Côté 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 en émission et en réception pour une performance du taux d'erreurs par bits (BER) requis.

3.2.3 Modèle de consommation d'énergie

a- Energie totale consommée par un cluster 'j' :

Il existe deux principales causes de consommation d'énergie dans un cluster : la consommation d'énergie lors de la transmission des données vers le cluster voisin (prochain saut) et la consommation d'énergie lors de la réception de données envoyées par le cluster voisin.

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

$$Q_j = \sum_{i=1}^N l_i + \text{Données captées dans le cluster } j \times FF$$

Où :

l_i : sont les données collectées 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 3.1 montre un modèle de consommation d'énergie par un cluster utilisant des communications coopératives pour la transmission et la réception de données.

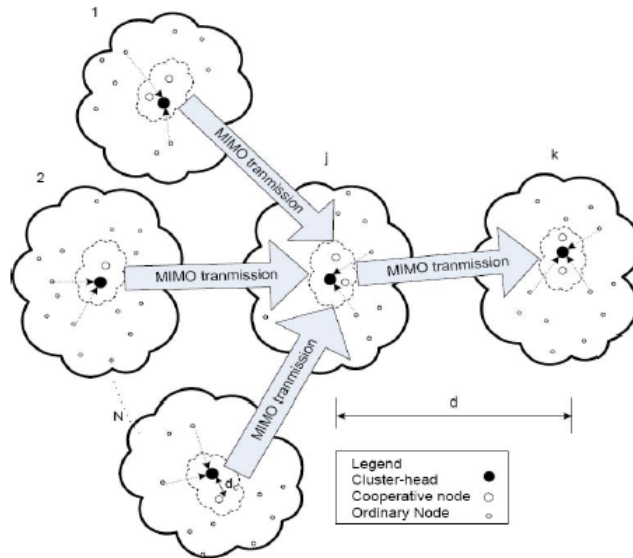


FIGURE 3.1 – Modèle de consommation d'énergie du cluster j

L'énergie totale consommée durant la transmission coopérative est :

$$E_{trans-coop-total} = E_{trans-coop} + E_{trans-OH-trans} + E_{trans-OH-rcv} \quad (3.1)$$

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.

L'énergie totale consommée durant la réception coopérative est :

$$E_{RCV-coop-total} = E_{RCV-coop} + E_{RCV-OH-trans} + E_{RCV-OH-rcv} \quad (3.2)$$

Où :

$E_{RCV-coop-total}$: est l'énergie totale consommée durant la réception coopérative.

$E_{RCV-coop}$: est l'énergie de réception coopérative inter-cluster.

$E_{RCV-OH-trans}$: est l'énergie consommée lors de la réception de données du CH à tous les nœuds coopératifs.

$E_{RCV-OH-rcv}$: est l'énergie consommée à la l'émission de données par $(N_T - 1)$ nœuds coopératifs.

3.2.4 Résultats de simulation

Le scénario de simulation dans la Figure 3.2. Il s'agit de la situation la plus courante dans les réseaux de capteurs. Lorsqu'un ou plusieurs nœuds capteurs détectent les données, ils les envoient au CH. Ensuite, le CH les envoie à la BS par transmission multi-saut. Les clusters voisins ainsi que les clusters dans le chemin de routage induisent aussi les données collectées.

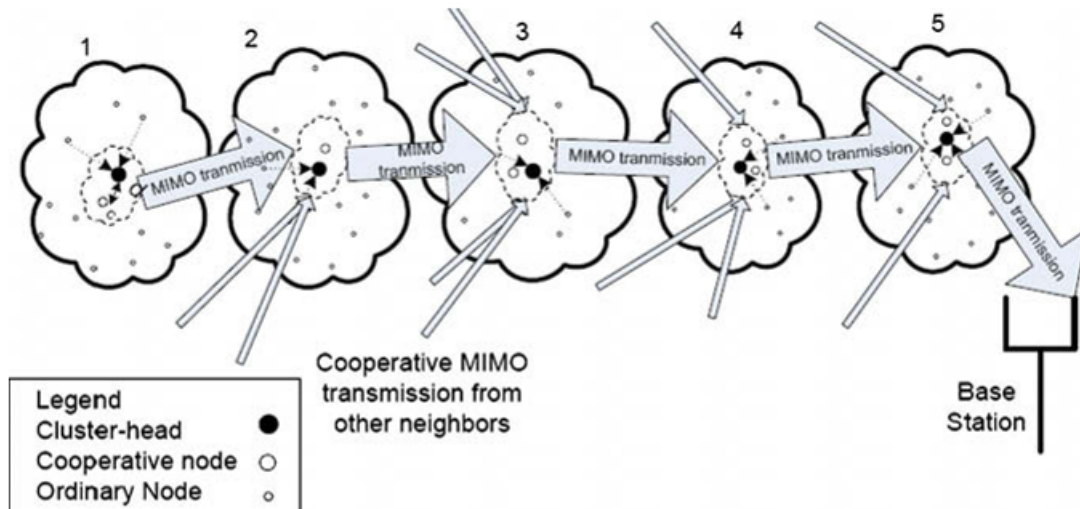


FIGURE 3.2 – Scénario de la simulation.

Les résultats de simulation montrent qu'il y a une légère différence entre l'énergie consommée par les clusters de bord (cluster 1) et les clusters à proximité de la station de base (cluster 5). Les résultats montrent que les clusters à proximité de la station de base ont consommé environ 15 fois plus d'énergie que le cluster de bord. Il est à noter que le cluster de bordure porte uniquement ses propres données détectées alors que le cluster près de la station de base supporte la charge des données des clusters voisins.

3.2.5 Discussion et critiques

Les auteurs se sont basés dans la solution proposée sur 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. Le routage coopératif multi-saut entre les clusters permet de réduire la consommation d'énergie par rapport au cas non coopératif. Dans les situations où la sélection optimale des nœuds coopératifs devient impossible, et afin d'obtenir des résultats plus réalistes les auteurs considèrent les données captées par les clusters comme des variables aléatoires.

Les clusters à proximité de la station de base supportent la charge des données des clusters voisins, alors ils consomment plus d'énergie que les autres clusters dans le réseau.

3.3 The energy efficient cooperative MIMO technique for hierarchical clustering protocol

Diverses recherches ont été faites pour améliorer la durée de vie du réseau de capteurs. La clusterisation est l'une des méthodes permettant de réduire la consommation d'énergie de chaque nœud déployé dans le réseau. LEACH [33](Low energy adaptive clustering hierarchy) est l'un des protocoles de routage les plus utilisés dans les RCSFs. Avec 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[32] proposent d'appliquer la technique MIMO coopérative sur le protocole de routage hiérarchique LEACH afin de prolonger la durée de vie du réseau tout en assurant le bon acheminement des paquets vers la station de base.

3.3.1 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 et le nœud coopératif 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.

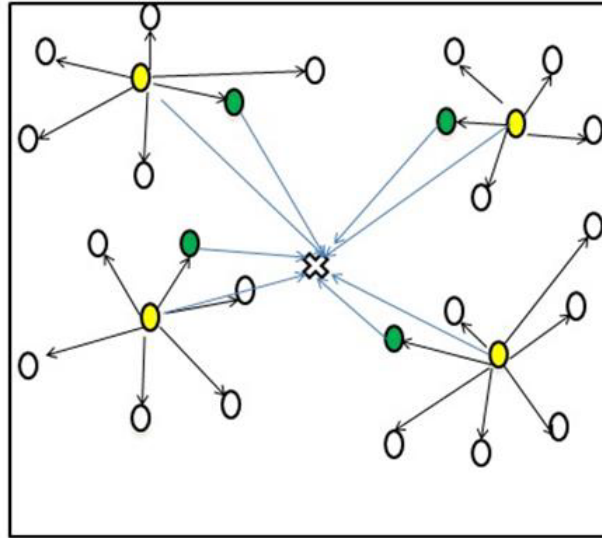


FIGURE 3.3 – Transmission de données vers la station de base.

Dans la figure ci-dessus, le cercle représente le nœud capteur (nœud ordinaire) déployé au hasard et la croix au milieu représente la station de base, les cercles de couleur jaune sont les clusters-heads, les flèches noires représentent les nœuds qui sont associés au cluster-head et les flèches qui sont en couleur bleue représentent les données finales envoyées la station de base.

Dans le schéma proposé lorsque tous les nœuds envoient leurs données détectées à leur cluster-head respectif, le cluster-head sélectionnera un nœud en tant que nœud coopératif qui envoie simultanément les données avec le cluster-head. La sélection du nœud coopératif est basée sur la puissance du signal.

Les nœuds en vert sont les nœuds coopératifs qui transmettent 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).

3.3.2 La consommation d'énergie dans une communication MISO ou SISO :

En supposant que le nombre de sauts 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 comme suit :

$$E_{bit} = (1 + \alpha) \frac{M_t N_0}{\frac{(P_b)^1}{M_t}} \times \frac{(4\pi d)^2}{G_t G_r \lambda^2} M_l N_f + \frac{P_c}{R_b} \quad (3.3)$$

Où :

- E_{bit} : est l'énergie consommée dans une communication MISO ou SISO.
- M_l : 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 portée 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 transmissions.
- G_r : représente le gain des antennes de réception.
- λ : est un coefficient qui dépend du nombre d'antennes émettrices et réceptrices.
- $\alpha = (\zeta/\eta) - 1$ ou ζ est la grandeur du rapport pic a la moyenne qui dépend du schéma du modulation liée a taille de la constellation, η l'efficacité de vidange de l'amplificateur de puissance.

3.3.3 Évaluation 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, la communication à courte distance de 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 performant.

3.3.4 Discussion et critiques

Le protocole 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 3.3. Mais le routage à un seul saut des clusters-heads a un inconvénient qui pénalise le protocole LEACH, 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, il encourt des problèmes de robustesse comme la défaillance des CHs. Le protocole n'utilise pas la communication inter-cluster dans le réseau car les CHs communiquent directement avec la station de base. Ce processus nécessite une grande puissance de transmission dans le réseau. C'est pour cela que LEACH n'est pas le mieux adapté

pour les réseaux denses qui requièrent une communication à un seul saut avec 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.

3.4 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 ce travail[36], les auteurs proposent un protocole permettant d'équilibrer la consommation d'énergie des nœuds dans les RCSFs. La solution proposée combine le protocole EB-LEACH (algorithme LEACH amélioré) et la stratégie MIMO coopérative. Le protocole est appelé EB-LEACH-MIMO.

3.4.1 Solution proposée

Le modèle du réseau proposé est montré dans la figure 3.4. Les N nœuds capteurs sont répartis suivant une distribution aléatoire dans une zone de $(M \times M)m^2$ et la station de base est loin de la zone de surveillance.

Le réseau est divisé en k clusters hexagonaux. Chaque cluster se compose d'un cluster-head et de nœuds ordinaires. Quelques nœuds ordinaires sont choisis en tant que nœuds coopératifs pour une transmission MIMO coopérative.

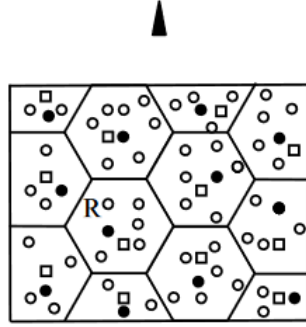


FIGURE 3.4 – Déploiement du réseau selon le modèle proposé.

Dans la figure ci-dessus, le triangle représente la station de base, le cercle en noir représente les clusters-heads, le cercle représente les nœuds ordinaires et les carrés représentent des nœuds coopératifs.

En 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'emplacement et l'énergie résiduelle du nœud. Ensuite la station de base calcule le nombre optimal de clusters K_{opt} et partitionne le réseau en k_{opt} hexagones, la partition hexagonale est faite seulement une fois pendant la vie du réseau. Dans le système proposé, tous les clusters-heads sont sélectionnés par la station de base.

Dans les phases suivantes, le nouveau cluster-head d'un cluster est choisi par le cluster-head de la phase précédente, cela peut éviter la transmission à longue distance entre la station de base et les nœuds qui est coûteuse en terme d'énergie. Un nœud candidat doit posséder les deux critères suivants :

- Son énergie résiduelle doit être plus grande que l'énergie seuil.
- Sa position doit être la plus proche possible du centre du cluster.

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

$$\min_{node\ i \in cluster} d(i) \quad tels\ que \quad E_{res}(i) > E_{th-ch} \quad (3.4)$$

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, il est responsable de la sélection des nœuds coopératifs selon la stratégie suivante :

$$\begin{aligned} \max_{\text{node } i \in \text{cluster}} E_{res}(i)/D^2(i) \quad & \text{tels que} \quad d_{min} \leq D(i) \leq d_{max} \\ \text{et} \quad & E_{res}(i) > E_{th-sch} \end{aligned} \quad (3.5)$$

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.
- E_{th-sch} : est l'énergie seuil qui peut être définie comme l'énergie résiduelle moyenne de tous les nœuds vivants dans le cluster.
- $E_{res}(i)$: est l'énergie résiduelle.

Après les phases ci-dessus, le cluster-head diffuse un message pour informer les nœuds coopératifs sélectionnés de leurs rôles dans la transmission coopérative, puis il crée et diffuse le programme TDMA (time division multiple access), qui inclut des intervalles de temps pour la transmission de données des nœuds ordinaires au cluster-head, du cluster-head vers les nœuds coopératifs, et du cluster-head et les nœuds coopératifs vers la station de base. Ensuite, les nœuds ordinaires transmettent les paquets de données au cluster-head dans leur propre intervalles de temps TDMA alternativement et s'endorment pendant le reste du temps. Après la fusion des paquets de données reçus, le cluster-head diffuse les données fusionnées à ses nœuds coopératifs. Enfin, les capteurs coopératifs et le cluster-head envoient coopérativement les données à la station de base.

Modèle de consommation d'énergie

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 sont désignées respectivement comme suit :

$$E_{MIMO_Tx}(l, d) = M_t l E_{Tx-elec} + \varepsilon_{M_t} l d^4 \quad (3.5)$$

$$E_{MIMO_Rx}(l) = M_r l E_{Rx-elec} \quad (3.6)$$

Où :

- $E_{Tx-elec}$: est la consommation d'énergie du circuit émetteur par bit.
- $E_{Rx-elec}$:est la consommation d'énergie du circuit du récepteur par bit.
- M_t : est le nombre de nœuds coopératifs.
- ε_t : est un coefficient qui dépend du nombre d'antennes émettrices, le taux d'erreur, 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 à la station de base.
- Des opérations de circuit correspondant à la transmission de données.
- La fusion des données par les cluster-heads.

Evaluation de performances

Pour analyser l'efficacité et l'équilibrage d'énergie du protocole proposé (EB-LEACH-MIMO), les protocoles EB-LEACH, LEACH-MIMO et LEACH [33] sont pris comme références. LEACH-MIMO est une simple combinaison de LEACH et la technique MIMO Coopérative. Les résultats de simulation montrent que la durée de vie du réseau avec le protocole EB-LEACH-MIMO est la plus longue. Son avantage est de 8% ,76% et 87% par rapport à EB-LEACH, LEACH-MIMO et LEACH respectivement. Cette amélioration significative provient des méthodes de partition hexagonale du réseau et la sélection des clusters-heads en tenant compte de la position et de l'énergie résiduelle du nœud en considération. Nous pouvons conclure que EB-LEACH-MIMO permet un meilleur équilibrage énergétique entre les nœuds dans un cluster que EB-LEACH LEACH-MIMO et LEACH.

Discussion et critiques

La solution proposée peut ne pas être efficace dans la mesure où le CH et les nœuds coopératifs 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 clusters-heads et les nœuds coopératifs sont donc des capteurs ordinaires et la station de base n'est pas souvent directement accessible.

3.5 Mobility aided coopérative MIMO transmission in wireless sensor networks

Dans cet article[37], les auteurs proposent aided mobilité en fonction du modèle de communication coopératif MIMO où quelques capteurs mobiles utilisent

les systèmes de diversité d'Alamouti.

Hypothèses

- Certain superviseurs rechargeable son choisis.
- Sélection des CH et sélection dynamique des nœuds coopératifs en utilisant n'importe quel version du protocole LEACH

La solution proposée Les superviseurs mobiles ne se déplacent pas aléatoirement et la station de base connaît l'emplacement de tous les capteurs déployés. La station de base calcule la taille du cluster dynamique et attribue une paire de superviseurs à chacun des clusters.

Les figures 3.5 et 3.6 expliquent les étapes du protocole proposé :

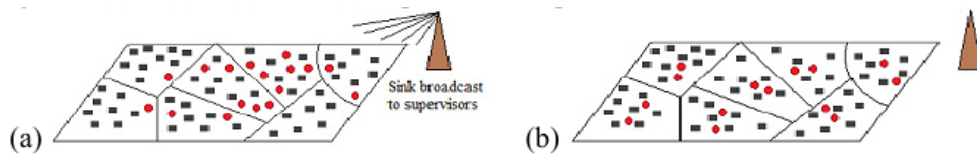


FIGURE 3.5 – (a) déploiement initiale, (b) Une paire des superviseurs prennent en charge un cluster et il sera localisé par la SB. Les superviseurs restants sont en mode veille.

Les cercles en rouge représentent les superviseurs mobiles et les carrés marron représentent les capteurs statiques en écoute.

- a- La communication initiale entre la station de base et les superviseurs : la SB envoie une requête à tous les superviseurs individuellement en mentionnant l'ID des superviseurs, leurs positions cibles et les Ids des auditeurs(les nœuds à l'écoute)doivent être pris en charge dans le cluster dynamique.
- b - Après avoir reçu la requête initiale de la SB, les superviseurs se déplacent vers leurs emplacements cibles assignées, après avoir atteint la localisation cible N, les superviseurs envoient un message (Ack) du format « S_{id}, Ack » à la SB pour l'informer qu'ils ont atteint leur position.
- c- Communication interne : la communication interne entre les auditeurs et les superviseurs a lieu afin de fixer un cluster et cette information est enregistrée par la SB.Un superviseur après avoir atteint sa destination,il diffuse un message contenant son identifiant et sélectionné l'ids de l'auditeur ($<L_{id}$ (1 à n)). L'auditeur, parmi plusieurs messages reçus, découvre celui contenant son propre identifiant. Il note que l'id du superviseur pour une communication de données supplémentaire et répond uniquement aux requêtes de ce superviseur.

Un auditeur attend un signal pendant un moment t_{wait} et passe en mode

veille. Ensuite, après un moment t_{sleep} , un auditeur devient actif pour écouter un signal à nouveau. L'auditeur arrête écoute d'autres messages de diffusion dès qu'il reçoit le message avec son id.

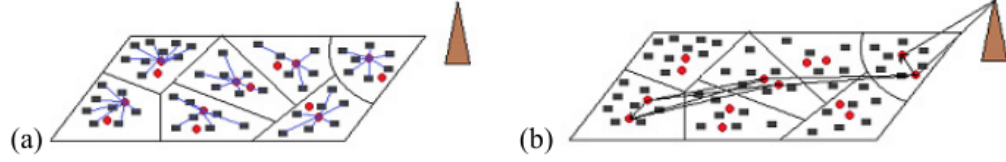


FIGURE 3.6 – (a) Collecte de données détectées. (b) Communication multi-saut en utilisant 2x1 et 2x2STBC.

- a- La phase de collecte de données : chaque nœud qui est à l'écoute dans un cluster dynamique utilise différents intervalles de temps afin de transmettre ses données au nœud superviseur assigné.
- b- La phase de compression : comme les données détectées par les capteurs de l'auditeur dans un cluster est en corrélation, les données recueillies au niveau du superviseur sont compressées, après la compression des données les nœuds superviseurs transmettent les données compressées à l'autre superviseur dans le cluster, ils règlent la distance entre eux pour envoyer les données à la SB directement ou avec une communication coopérative à un superviseur intermédiaire sur le chemin de la SB. Cette stratégie coopérative implique 2*1 et 2*2MIMOSTBC pour une longue distance.

On se basant sur les étapes des figure 3.5 et 3.6, l'énergie consommée par les superviseurs et par les nœuds à l'écoute peut être exprimé comme suit :

$$E_{total} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 \quad (3.7)$$

$$E_{supervisor} = E_1 + E_2 + E_{3a} + n.D.E_{br} + E_5 + E_6 \quad (3.8)$$

$$E_{listener} = E_{3b} + n.D.E_{bt} \quad (3.9)$$

Où :

Dans le circuit récepteur des nœuds superviseurs afin de recevoir la requête de la SB :

$$E_1 = \frac{m}{2} \cdot Q_{ini} \cdot E_{br} \quad (3.10)$$

$$Q_{ini} = L(S_{id}) + L(location) + \frac{2n}{m} \cdot L(L_{id}) \quad (3.11)$$

$$E_{br} = \frac{P_{cr}}{R_b} \quad (3.12)$$

Où :

Q_{ini} : est la requête initiale.

E_{bt} : La consommation d'énergie par bit pour l'émetteur.

L_{id} : L'identifiant du nœud à l'écoute.

S_{id} :le message d'acquiescement envoyé par les superviseurs.

E_{br} :La consommation d'énergie par bit pour le récepteur.

location : emplacement cible (petite région carrée) déterminée par la SB.

m :le nombre de capteurs de supervision.

n est le nombre de capteurs du nœud à l'écoute.

- L'énergie consommée par le capteur de supervision en raison de sa mobilité est :

$$E_2 = m.e_m.d_m \quad (3.13)$$

Où :

e_m : l'unité d'énergie sur l'unité de distance (joules / mètre).

d_m : distance entre les capteurs de supervision.

- Communication entre les superviseurs et les auditeurs dans l'étape de sélection du cluster :

$$E_{3a} = (m/2).E_{bt}.((2n/m).L(L_{id}) + L(S_{id})) \quad (3.14)$$

(superviseur diffuse $\langle L_{id}(1 \text{ à } n), S_{id} \rangle$)

$$E_{3b} = n.E_{br}.((2n/m).L(L_{id}) + L(S_{id})). \quad (3.15)$$

(L'auditeur recevant leur identifiant dans le n -ième paquet des superviseurs)

$$E_3 = E_{3a} + E_{3b} = (m/2).E_{bt}.((2n/m).L(L_{id}) + L(S_{id})) + n.E_{br}.((2n/m).L(L_{id}) + L(S_{id})) \quad (3.16)$$

Où :

$$E_{bt} = (P_{PA} + P_{ct})/R_b \quad (3.17)$$

Où

E_{bt} : La consommation d'énergie par bit pour Le récepteur.

- Les superviseurs recueillent les données auprès des auditeurs.

$$E_4 = n.D.E_{bt} + n.D.E_{br} \quad (3.18)$$

(Collecte de données : circuit de surveillance Tx et contrôleur Rx).

D : représente la taille des données transmises par un auditeur

Où :

$$E_{bt} = (P_{PA-local} + P_c)/R_b \quad (3.19)$$

Et $P_{PA-local}$ est la consommation d'énergie de l'amplificateur de puissance qui est :

$$P_{PA-local} = (1 + \alpha) \times E_{b-BER} \times R_t \times (4\pi d_{local})^2 M_t N_f / G_t G_r \lambda^2 \quad (3.20)$$

Où :

R_t : Le taux de transmission des données.

E_{b-BER} : l'énergie par bit requise pour un donné(Exigence BER).

d_{local} : la valeur maximale de la gamme de communication des auditeurs

N_f : est le bruit au niveau du récepteur

- La compression de données pour obtenir des données non redondantes :

$$E_5 = (m/2).n.D.e_c. \quad (3.21)$$

Où :

e_c : Désigne le coût énergétique par bit pour la compression des données

n.D : les données totales collectées

- La Communication utilisant le MIMO coopératif avec communication intra-cluster :

$$E_{6a} = n.D.(m/2).E_{bt} + n.D.(m/2).E_{br} \quad (3.22)$$

La communication coopérative avec la SB

$$E_{6b} = m.P_{PA-long}.(n.D/R_{long}) \quad (3.23)$$

On obtient l'équation suivante :

$$E_6 = E_{6a} + E_{6b} = n.D.\frac{m}{2}.E_{bt} + n.D.\frac{m}{2}.E_{br} + m.P_{PA-long}.\left(n.\frac{D}{R_{long}}\right) \quad (3.24)$$

Où :

$P_{PA-long}$: Est la consommation d'énergie des amplificateurs de puissance au nœud transmetteur.

R_{long} : est le débit binaire de transmission.

Résultat de simulation

Les résultats de simulation montrent que la durée de vie moyenne du réseau est élevée en raison de la faible consommation d'énergie. Avec les superviseurs en écoute un nombre beaucoup plus important de nœuds restent en vie même après plusieurs milliers de cycles de communication. Les résultats de simulation montrent que le modèle proposé est meilleur que les stratégies existantes en termes de durée de vie du réseau et le taux avec lequel les capteurs meurent. À partir des résultats de la simulation, il est évident que si des capteurs superviseurs mobiles rechargeables sont utilisés, un bon équilibre mutuel entre la durée de vie du réseau et la possibilité de surveiller un réseau flexible

3.6 Adaptive communication and coopérative MIMO cluster formation for improved life time in wireless sensor networks

Dans cet article[38],les auteurs ont proposé une méthode prometteuse pour améliorer l'efficacité énergétique qui est l'utilisation d'une technique MIMO coopérative (CO-MIMO).La technique proposée consiste à utiliser des nœuds qui forment des clusters pour transmettre et recevoir des signaux à l'aide d'une antenne réseau virtuel.Il propose également une méthode pour choisir de manière adaptative le nombre de nœuds qui forment un clusterMIMO afin d'optimiser la durée de vie du réseau et d'éviter les déconnexions. La méthode proposée tient compte non seulement de la consommation totale d'énergie mais aussi de la distribution de l'énergie au sein du réseau, afin de maintenir la distribution d'énergie sur le réseau aussi uniforme que possible.

La solution proposée

La méthode proposée se base sur l'utilisation du CO-MIMO qui est employée pour certaine transmission. Elle permet aux réseaux d'être plus efficaces sur le plan énergétique et d'avoir une meilleure répartition de ses réserves d'énergie de transmission en tirant partie des multiples techniques de transmission disponibles et les tailles des clusters pour les transmissions CO-MIMO. Lors de l'utilisation des CO-MIMO, les données transmises peuvent provenir à partir d'un seul nœud ou de divers nœuds du cluster de transmission.

La première étape consiste à synchroniser et à échanger des données qui doivent être transmises parmi les nœuds d'émission.

A l'étape 2, les deux capteurs transmettent différents symboles en même temps à l'aide d'un système MIMO en utilisant le modèle V-BLAST afin d'exploiter la diversité spatiale où les symboles sont regroupés dans des trames de la taille des antennes de réception.

A l'étape 3, les nœuds de réception échangent les informations reçues afin de décoder les symboles reçus, la sortie binaire du convertisseur analogique-numérique du nœud récepteur est envoyé aux nœuds responsables de l'égalisation et le décodage du signal reçus.

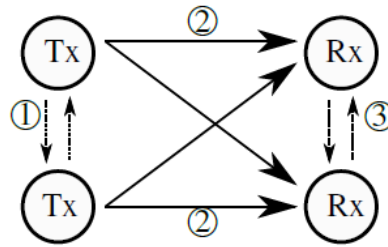


FIGURE 3.7 – Les étapes CO- MIMO de communications.

A la transmission :

Un nœud central qui diffuse son paquet de données vers des nœuds voisins doit effectuer M_t-1 transmissions avec un coût de E_{intra}/M_t (E_{intra} est l'énergie nécessaire à transmettre un paquet de données à un autre capteur situé dans le CO-MIMO frontière du cluster, représentée comme 1 et 3 sur la figure 3.7). Comme le paquet est divisé en paquets plus petits pour la transmission CO-MIMO. Il en va de même pour la consolidation du paquet sur la réception du cluster CO-MIMO, où M_r-1 transmissions avec un coût d' E_{intra}/M_r sont réalisées sur un nœud central pour la péréquation et le décodage, ce qui nous donne les équations suivantes :

$$E_{tx_{intra_{tx}}} = \frac{M_t - 1}{M_t} E_{intra} \in \mathbb{R} \quad (3.25)$$

$$E_{tx_{intra_{rx}}} = \frac{M_r - 1}{M_r} E_{intra} \in \mathbb{R} \quad (3.26)$$

A la réception : La diffusion et la consolidation du paquet dans les clusters CO-MIMO consomment une énergie importante sur les radios en écoutant les transmissions. Par conséquent, M_t-1 réceptions avec un coût de E_{rx}/M_t (E_{rx} est le coût énergétique pour la réception d'un paquet de données), M_r-1 réceptions avec un coût de E_{rx}/M est nécessaire lorsque les symboles reçus sont transmis au

nœud central pour le décodage. Ainsi, L'énergie dépensée avec la réception des clusters d'émission et de réception est :

$$E_{rx_{intra_{tx}}} = \frac{M_t - 1}{M_t} E_{rx} \in \mathbb{R} \quad (3.27)$$

$$E_{rx_{intra_{rx}}} = \frac{M_r - 1}{M_r} E_{rx} \in \mathbb{R} \quad (3.28)$$

Ainsi le coût total pour la transmission des paquets en utilisant le CO-MIMO est donné par :

$$E_{C-MIMO} = E_{tx_{inter}} + E_{tx_{intra_{tx}}} + E_{tx_{intra_{rx}}} + E_{rx_{intra_{tx}}} + E_{rx_{intra_{rx}}} + E_{rx} \in \mathbb{R} \quad (3.29)$$

Où :

$E_{tx_{inter}}$: l'énergie dépensée pour transmettre un paquet de données en utilisant une puissance supérieure pour une transmission à longue distance.

E_{rx} :

Avantages

Avec CO-MIMO, il est possible d'améliorer la distribution d'énergie dans le réseau, en transmettant sur une plus grande distance, ceci réduit la consommation énergétique des nœuds qui se situe au centre du réseau

Inconvénients

L'utilisation de CO-MIMO pour transmettre aux nœuds situés près des nœuds de transmission est inefficace, comme l'énergie nécessaire pour diffuser les informations et synchroniser, les nœuds à la réception et la transmission des clusters l'emporterait sur tout gain réalisé dans les étapes MIMO.

Résultats de simulation

Les résultats montrent que lorsqu'aucune technique CO-MIMO n'est utilisée, l'énergie sur le centre est mal répartie, illustrée par l'écart type σ entre les réserves d'énergie des nœuds, bien que la distribution semble s'améliorer après un certain temps. Cela est vrai en raison du fait que les nœuds du centre manquent d'énergie, ce qui se traduit par un σ plus petit lorsque le nombre de nœuds avec de très petites réserves d'énergie augmente. Pour les bords du réseau, la distribution d'énergie est plus uniforme lorsque la proposition de l'algorithme est utilisée.

3.7 Efficient Clustering Technique for Cooperative Wireless Sensor Network

Dans ce travail [39], les auteurs ont proposé une nouvelle technique de clusterisations, avec l'intégration du VMIMO (Virtual Multiple Input Multiple Output) en deux étapes. En premier lieu, des cluster-heads temporaires et leurs nœuds coopératifs seront sélectionnés. Par la suite, les données collectées seront acheminées à partir de ces derniers vers la station de base, par conséquent la clusterisation finale sera effectuée dans la deuxième partie.

3.7.1 la solution proposée :

Les deux phases de l'algorithme de clusterisation sont les suivantes :

1) La sélection des clusters-heads et l'identification de leurs nœuds coopératifs :

La sélection des cluster-heads sera effectuée en suivant le même principe que celui du protocole LEACH[33] . Afin de former les clusters, les autres nœuds du réseau sélectionneront leur CH respectifs en fonction de la puissance du signal reçu (RSSI). Par la suite, chaque cluster-head sera chargé de sélectionner parmi ses voisins, les meilleurs nœuds pouvant assurer la fonction de nœud coopératif en diffusant un message d'invitation pour le rejoindre. Les nœuds qui reçoivent le message d'invitation devront arrêter le compteur de probabilité de devenir CH, collecter les données de leurs voisins et les envoyer au plus proche cluster-head. Chaque CH compare sa liste de voisin avec la liste des voisins qu'il a reçu de chacun de ses voisins. Le nœud ayant un nombre minimum de voisins communs devrait être choisi comme nœud coopératif pour former le réseau d'antennes virtuelles. Les nœuds ayant le nombre minimum de voisin communs seront plus adaptés à devenir nœuds coopératifs en raison de leurs données moins corrélées.

2) la formation des clusters :

Chaque CH va maintenant diffuser son statut de cluster-head avec la liste de tous les nœuds qui devraient le rejoindre, la liste à un statut spéciale pour le nœud qui a été choisie pour devenir un CN(nœud coopératif).

Les nœuds coopératifs se déclarent également être CH avec une liste de nœuds commune qui peut être facilement obtenue en comparant la liste de ses voisins et les voisins reçus du CH déjà existant . Ces voisins devraient traiter le nœud coopératif en tant que CH. Un nœud membre du cluster peut avoir obtenu ce

message de plus d'un nœud. Il devra donner son consentement au CH le plus proche et ignorer les autres messages.

3.7.2 La formulation du problème

Tout le problème peut être divisé en deux parties, la consommation d'énergie par un nœud pendant la clusterisation et la consommation d'énergie par un nœud après le clustering. La sommation de ces deux énergie fournira l'énergie totale consommée par chaque noeud dans le réseau :

$$E_{total} = E_{local} + E_{longue-distance} \quad (3.30)$$

Les auteurs ont supposé que des clusters uniformes ont été formés dans le réseau et après la deuxième phase un cluster-head ne contient que le nœud coopératif. Soit n_1 le Nombre de nœuds attachés à chaque nœud coopératif (évidemment $n > n_1$ ainsi le nombre de nœuds dans le cluster est (nn_1+1) .Chaque noeud dans un cluster détecte K bits dans une période de temps donnée, les noeuds sont étroitement espacé ,donc il y a de grande possibilité de corrélation entre les données détectées par les nœud, c'est pour cette raison que, la première compression de données aura lieu au niveau des nœuds coopératifs et la deuxième compression sera faite au niveau des CH .

Après le clustering, deux types de communications auront lieu. Premièrement, la communication locale ou intra-cluster puis la communication longue distance dans laquelle le CH envoie des données à la station de base à l'aide des nœuds coopératifs.

Pour la communication locale, ils ont supposé un Modèle de perte de chemin avec du bruit additif Gaussian blanc et pour une communication longue distance ils ont opté pour Rayleigh qui utilise le codage spatio-temporel par bloc pour la communication coopérative à longue distance.

- 1) l'énergie dans la communication locale

$$E_{local} = E_1 + E_2 + E_{bro} + E_{comp} \quad (3.31)$$

Où :

E_1 : Energie consommée durant l'envoi des données par les nœuds ordinaires aux nœuds coopératifs

E_2 : Energie consommée durant l'envoi des données par les nœuds coopératifs au cluster-heads.

E_{com} : Energie consommée pour assurer la tâche d'agrégation de données

E_{bro} : la consommation d'énergie pour la phase de diffusion

- 2) Energie consommée lors de la communication longue distance

$$E_{lh} = P_{MIMO} \frac{K}{R_{lh}} + ((n_1 + 1)P_t + P_r) \frac{K}{R_{lh}} \quad (3.32)$$

Où :

p_{mimo} : la puissance consommée par l'amplificateur de puissance à l'émission

R_{lh} : représente le débit binaire de transmission

K : la quantité de données à envoyer à la station de base

$(n_1 + 1)$: donnés qu'un nœud transmet à la station de base

P_r : la puissance de transmission d'un nœud

P_t : la puissance de réception d'un nœud

l'ensemble de consommation d'énergie est :

$$E_{total} = \frac{nn_1}{R_{intra}} [KP_{SISO1} + (P_t + P_r)K] + \frac{n_1}{R_{intra}} [KP_{siso2} + (P_t + P_r)K] + (n + n_1)KE_{comp} + \frac{P_{siso}K}{R_{intra}} + \frac{(P_t + n_1P_r)K}{R_{intra}} + \frac{P_{MIMO}K}{R_{lh}} + [(n_1 + 1)P_t + P_r] \frac{K}{R_{lh}}$$

Où : $P_{SISO1}, R_{intra}, P_{siso2}$ [39]

3.8 Massive MIMO Cooperative Communications for Wireless Sensor Networks : Throughput and Energy Efficiency Analysis

Dans cet article[40], le travail proposé par les auteurs repose sur l'idée de densification massive du réseau en augmentant considérablement le nombre de capteurs dans une zone donnée dans en utilisant le mode TDD (division Duplex temporaire) [41]. En utilisant une récente technologie qui est mimo massive (plus de 400 antennes, sans aucune modification de l'infrastructure du réseau), les auteurs ont transposé l'idée à un déploiement massif de capteurs et montrer les avantages d'une tel infrastructure.

3.8.1 La solution proposée :

Les auteurs ont supposé que K station de base sont déployés dans une zone. De plus, ils ont considéré que les capteurs peuvent coopérer les uns avec les autres afin de réaliser un réseau de communication virtuel MIMO.

Les capteurs doivent périodiquement signaler les mêmes données liées à leur environnement vers la station de base. Cette période de déclaration doit être divisée en deux phases. La première phase est consacrée à l'estimation des canaux avec

scénario TDD. La phase d'estimation du canal permet au capteurs d' optimiser la transmission beamforming. Fondamentalement, pour estimer la chaîne, chaque récepteur (station de base) doit envoyer une séquence d'apprentissage. La deuxième période est consacrée à la phase de transmission. Durant cette période, les émetteurs envoient les données à la station de base, en ajoutant, un prétraitement d'informations , tel qu'un beamforming avec une transcription Hermitienne de l'estimation bruyante de la matrice du canal acquise pendant la période d'apprentissage.

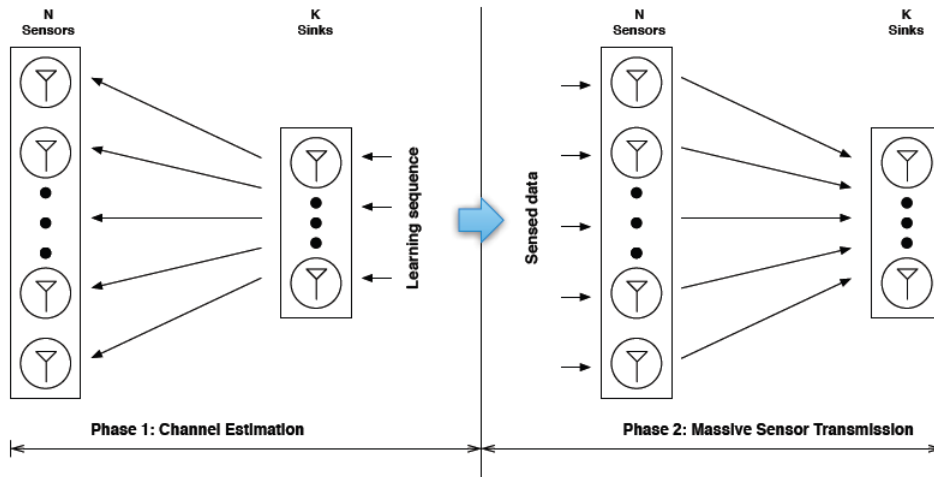


FIGURE 3.8 – Protocole MIMO Massive

- 1) la Période Pendant la période du , les récepteurs doivent transmettre une séquence d'entraînement. chaque k stations de base transmettent une séquence de données notée c_k aux capteurs N. Toute la séquences du (c-à-d c_1, \dots, c_k) est orthogonal . La taille de chaque séquence d'entraînement est égale à M symboles. La Séquence reçue par chaque émetteur des K stations de base peut être noté $C = [c_1, c_2 \dots c_k]$, de sorte que $C^H C = M * Id$
Où :

$$\frac{1}{N} H^T H^* \rightarrow \frac{1}{N} \begin{bmatrix} N & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & N \end{bmatrix} = Id$$

(3.33)

C^H : matrice

- 2) Période de transmission Tous les capteurs mesurent les mêmes données S . Ils ne coopèrent pas et chaque capteur connaît seulement Le canal vers les

K stations de base . Le capteur exploite le protocole TDD et la réciprocité du canal pour transmettre les données détectées.

Le signal du la SB peut être formul e comme suit :

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{N,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{1,K} & \cdots & h_{N,K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_K \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Où :

$$r_j = \frac{N}{\sqrt{K}}s + z_j \quad (3.35)$$

x_i est la donnée envoyée par le capteur i. Dans notre cas, le les données transmises x_i sont calculées comme suit :

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{K}}\widehat{H}^* \begin{bmatrix} s \\ \vdots \\ s \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

l'ensemble de consommation d'énergie totale par le système qui correspond à l'énergie consommée par les K stations de base lors périodes du training (c'est-à-dire αT) plus la quantité d'énergie consommée par les capteurs pendant la périodes de transmission (c'est-à-dire $(1 - \alpha) T$) , est calculée comme suit.

$$E = \alpha KP + (1 - \alpha)P \sum_{i=1}^N \left(K\sigma^2 + E \left| \sum_{j=1}^K h_{i,j} \right|^2 \right) \quad (3.37)$$

Où :

α, K, P, σ [40].

3.9 An Energy Efficient Cooperative Hierarchical MIMO Clustering Scheme for Wireless Sensor Networks

Dans cet article[42], les auteurs ont présenté un clustering hiérarchique coopératif efficace en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. Le coût de la communication est un facteur crucial dans l'épuisement de l'énergie des nœuds capteurs. Dans le schéma proposé, les nœuds coopèrent pour former des clusters à chaque niveau de l'hierarchie du réseau assurant ainsi une couverture maximale et des dépenses énergétiques minimales.

3.9.1 La solution proposée

Les principales sources de consommation d'énergie dans les nœuds capteurs sont la détection des données, le traitement des données et la communication. En général, les nœuds peuvent fonctionner en quatre modes : transmission, réception, idel et sommeil.

L'énergie totale consommée est la somme de l'énergie consommée durant les communications intra-cluster (E_{local}) et inter-cluster (E_{CH}) :

$$E_{total} = E_{local} + E_{CH} \quad (3.38)$$

3.9.2 Les étapes de l'algorithmes de clusterisations :

1)phase d'initialisation :

- a- Après la mise en place du réseau, chaque capteur déclenche l'algorithme de clustering. Et afin d'éviter les collisions, les auteurs propose d'utiliser un schéma (CSMA / CA)[34] . Chaque noeud envoie un message HELLO a son voisin . Le message HELLO est diffusé à un faible niveau de puissance. Le but de l'utilisation de faible puissance est d'envoyer le message à un seul voisin d'un saut qui se trouve à proximité de lui pour économiser l'énergie. Le message HELLO contient l'ID du nœud, son énergie restante et une liste de ses voisins.
- b- La formation des clusters se fait en suivant les étapes suivantes :
 - Étape 1 : Chaque noeud compare son énergie avec celle de ses voisins. Si un nœud v a la plus grande quantité d'énergie dans son voisinage, il se déclare comme étant un Cluster-Head.
 - Étape 2 : si v n'est pas le meilleur nœud (c-à-d. le nœud ayant la plus grande quantité), il envoie un message au nœud avec la plus grande énergie résiduelle

pour devenir un cluster -head.

Étape 3 : après avoir envoyé le message au meilleur noeud, le noeud v attend une durée fixe de temps (δ) pour que le meilleur noeud réponde.

- c- Le choix des noeuds coopératifs est conçu de manière à maximiser la durée de vie du réseau. Le(CN) est atteint en fonction de la distance entre les CCS(centrale coordinating station) et le CH . Les noeuds coopératifs sont choisis de telle sorte qu'ils se trouvent dans un voisinage géographique proche du cluster. Le deuxième critère de sélection des noeuds coopératifs est l'énergie résiduelle des noeuds .

3.9.3 La phase de routage de données vers la station de base

Les CH voisins échangent un message ROUTE. Dans ce message, Les CH annoncent l'identification du cluster dont l'énergie résidu est la plus grande. Un tel cluster devien un cluster de routage.

3.9.4 Choix des clusters-head de routage

La sélection des CHs de routage est basée sur l'efficacité énergétique ,aussi il faut trouver les meilleurs liens entre les noeuds pour assurer un transfert de données fiable et efficace. Cela demande une sélection minutieuse des clusters

3.10 A Cooperative MIMO Framework for Wireless Sensor Networks

Dans ce travail [43] les auteurs explorent l'utilisation de la communication coopérative multi-entrées multi-sorties (MIMO) pour prolonger la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil. Les capteurs à antenne unique sont regroupés dans des réseaux d'antennes virtuelles qui peuvent servir de noeuds virtuels MIMO (VMIMO). Ils ont conçu un protocole de regroupement coopératif distribué (CCP), qui exploite le gain de diversité de VMIMO en sélectionnant de manière optimale les noeuds coopérants (CN) au sein de chaque cluster et en équilibrant leur consommation d'énergie.

3.10.1 La solution proposée :

Les auteurs ont commencé par la formulation du problème OCS (optimal CN selection) . Par conséquent, ils ont résolu deux sous-problèmes : Trouver le nombre

optimal de nœud coopératifs dans un cluster et le problème d'affectation des CN. Ils ont considéré un réseau de capteurs sans fil avec N nœuds répartis de manière aléatoire de densité μ .

Les noeuds sont supposés être capables de contrôler leur transmission, et ajuster la plage de transmission jusqu'à R_{inter} . R_{intra} et R_{inter} sont des paramètres d'entrée, dont les valeurs doivent être sélectionnées pour s'assurer que le réseau est connecté

Le temps est divisé en fentes, où une fente représente l'intervalle entre deux événements successifs regroupant les instances. Dans un intervalle de temps donné, il existe trois types de noeuds dans le réseau : nœuds ordinaires (ON), nœuds coopérants (CN) et un CH, qui est également un CN.

Pour faciliter l'opération VMIMO, ils ont utilisés un mécanisme de synchronisation

Tous les nœuds peuvent détecter et transmettre des données. Chaque emplacement commence par une mini-fente de clustering, suivi d'un mini-slot de coopération, et finalement de plusieurs emplacements de transmission. Dans le mini-slot de coopération, le CH sélectionne plusieurs CN de telle sorte que les CN sélectionnés peuvent communiquer en tant que Nœud VMIMO avec des clusters voisins (dont les CH sont à une distance R_{inter}) en utilisant l'énergie minimale possible :

$$\underset{\{b_t, b_r\}}{\text{minimize}} \quad E(b_t, b_r) + \left(\frac{PL}{R} + H\right)(M_t + M_r) \quad (3.39)$$

Où :

$E(b_t, b_r)$ l'énergie par paquet sous DSTBC ou DVBLAST.

L est la taille du paquet en bits,

R est le taux de transmission en bps,

H est protocole aérien associé à chaque CN,

P est la consommation d'énergie du circuit par CN,

$$M_t = \sum_{i=1} b_t^{(i)} \quad (3.40)$$

$$M_r = \sum_{j=1} b_r^{(j)} \quad (3.41)$$

3.10.2 Les résultats de la simulation :

Dans cette section, les auteurs ont évalué les performances de CCP, qui intègre l'algorithme OCS, l'algorithme d'affectation CN et le mécanisme de routage C-EBR. Les programmes simulation ont été écrits dans CSIM [CSI]. Les indicateurs de performance comprennent la durée de vie du réseau, la consommation d'énergie

par paquet et la variance de l'énergie résiduelle (moyen sur la durée de vie du réseau). Ces paramètres de performance sont enregistrés jusqu'à ce que un noeud soit hors batterie (similaire à la définition de durée de vie dans [Chang et Tassiulas 2004]) et aussi jusqu'à ce que le réseau se déconnecte. La première définition[chang] est plutôt conservatrice, car le réseau peut toujours fonctionner même après l'échec de quelques nœuds. Selon les deux définitions, la durée de vie du réseau est mesurée par le nombre rondes. Dans chaque round, un noeud génère un paquet avec une probabilité q , ce qui reflète l'intensité du trafic.

3.11 Etude comparative

Dans le tableau suivant nous présenterons une étude comparative des protocoles présentés ci-dessus

N°	Intitulé de l'article	Stratégie adaptée	Basé sur	Technique utilisé
1	Uniform energy consumption through adaptive optimal selection of cooperative MIMO schemas in wireless sensor networks[35]	MIMO coopérative	sélection adaptative de nœuds coopératifs	STBC
2	The energy efficient cooperative MIMO technique for hierarchical clustering Protocol [32]	MIMO coopérative	-Partition du réseau en cluster -Sélection de nœuds coopératifs selon la puissance du signal	STBC
3	A Joint Energy-balanced Organizing Scheme with Hexagon-Clustered Algorithm and Cooperative MIMO for WSNs[36]	MIMO(EB-LEACH-MIMO)	-partition du réseau en un nombre optimal de cluster -Sélection des nœuds coopératifs selon l'énergie résiduelle, distance	STBC
4	Mobility aided cooperative MIMO transmission in wireless sensor networks [37]	MIMO coopérative	-partition du réseau en superviseurs mobiles et les capteurs statique en écoute.	STBC

5	Adaptive communication and cooperative MIMO cluster formation for improved lifetime in wireless sensor networks [38]	MIMO coopérative	-partition du réseau -sélection des nœuds coopératifs selon la consommation totale et la distribution d'énergie.	V-BLAST
6	Efficient Clustering Technique for Cooperative Wireless Sensor Network [39]	MIMO virtuelle	-partition du réseau -sélection des nœuds coopératifs selon la distance.	STBC
7	Massive MIMO Cooperative Communications for Wireless Sensor Networks : Throughput and Energy Efficiency Analysis [40]	MIMO Massive	-Réseau de communications.	beam-forming.
8	An Energy Efficient Cooperative Hierarchical MIMO Clustering Scheme for Wireless Sensor Networks[42]	Hierarchies MIMO cooperative	-La sélection des nœuds coopératifs selon la distance.	-
9	A Cooperative MIMO Framework for Wireless Sensor Networks [43]	MIMO coopérative	-Routage équilibré en énergie -sélection des nœuds coopératifs selon l'énergie	DSTBC, DVBLAST

FIGURE 3.9 – Tableau de comparaison des quelques stratégies MIMO

la technique MIMO la plus optimale en terme d'énergie est celle utilisée dans l'article Mobility aided coopérative mimo transmission in wireless sensor networks.

3.12 Conclusion

L'efficacité énergétique des transmissions MIMO est utile pour les réseaux de capteurs sans fil où chaque nœud doit fonctionner sans recharge de batterie pendant très longtemps et la consommation d'énergie est la contrainte la plus importante dans ce type de resulta. 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 RCSFs qui ont comme objectifs de 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 stratégies pour démontrer les avantages de ce type d'architecture dans les RCSFs.

Dans le quatrième chapitre,nous allons présenter le déploiement du réseau de la technique MIMO coopérative et le résultat de simulation du protocole EB-LEACH-MIMO.

Simulation et analyse des résultats

4.1 Introduction

La simulation est un processus qui consiste à concevoir un modèle du système 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.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par argumenter le choix de l'outil de simulation qui sera utilisé, puis suivra la description des étapes de la simulation. Finalement, on terminera par donner les résultats de la simulation du protocole que nous avons implémenté ainsi que les paramètres associés avec une analyse des résultats obtenus en nous basant sur certains paramètres de performances, le tout clôturé par une conclusion.

4.2 Choix du matlab

Notre travail consiste à évaluer les performances du protocole EB-LEACH-MIMO sur MATLAB qui est développé par la société The MathWorks, MATLAB permet de résoudre les problèmes scientifiques et techniques. C'est un langage basé sur les matrices, il allie mathématique, modélisation graphique et programmation.

MATLAB dispose d'une large bibliothèque de fonctions intégrées et pré-écrites avec des notations simples et puissantes pour de nombreuses tâches de calculs communes par rapport aux autres simulateurs de réseaux de capteurs . Ces fonc-

tions peuvent être construites dans tous les langages de programmation, MATLAB permet de les retrouver dans un seul endroit.

La simulation du protocole EB-LEACH-MIMO requiert l'utilisation et la manipulation de vecteurs, de tableaux et de matrices. Le côté évaluation des performances quant à lui, requiert la génération de graphes, et donc l'utilisation des outils de traçage qu'offre MATLAB. Dans la simulation on utilisera la version R2009b (8.4.0.150421) de MATLAB[31].

4.3 Etapes de la simulation

4.3.1 The Energy Efficient Cooperative MIMO Technique for Hierarchical Clustering Protocol

a)Déploiement des nœuds capteurs

Afin d'évaluer les performances du protocole,nous avons considéré un réseau de capteurs constitué de 100 nœuds capteurs aléatoirement déployés sur une zone d'intérêt de 100 m^2 de surface. La station de base (SB) est positionnée aux coordonnées (50m, 50m). Initialement,les nœuds sont tous de type ordinaires (voir le figure 4.1).

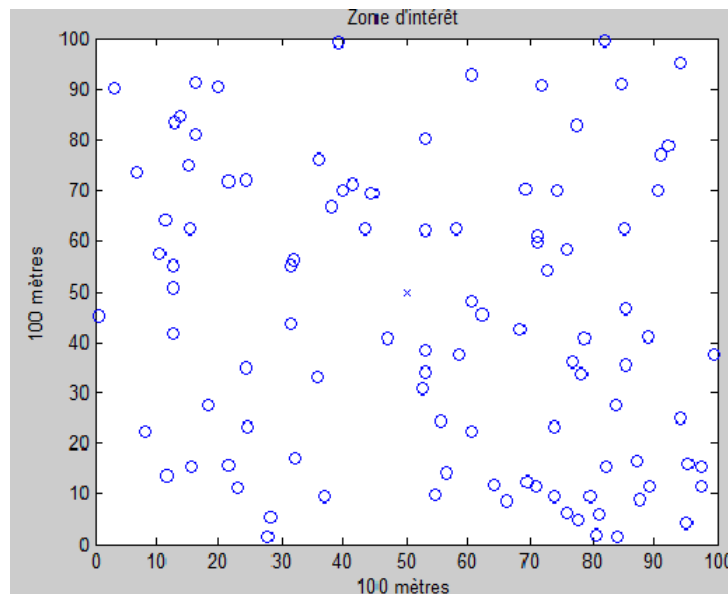


FIGURE 4.1 – Déploiement aléatoire de 100 nœuds capteurs.

b) Sélection des CHs et création des clusters

Des calculs et tests sont réalisés pour identifier les CHs, former les clusters et choisir les nœuds coopératifs en suivant les différentes étapes du protocole LEACH [33].

Les nœuds ordinaires ont rejoint leur CHs par rapport à la distance minimale et chaque nœud ordinaire transmettra ses données au CH.

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 4.3 ci-dessous :

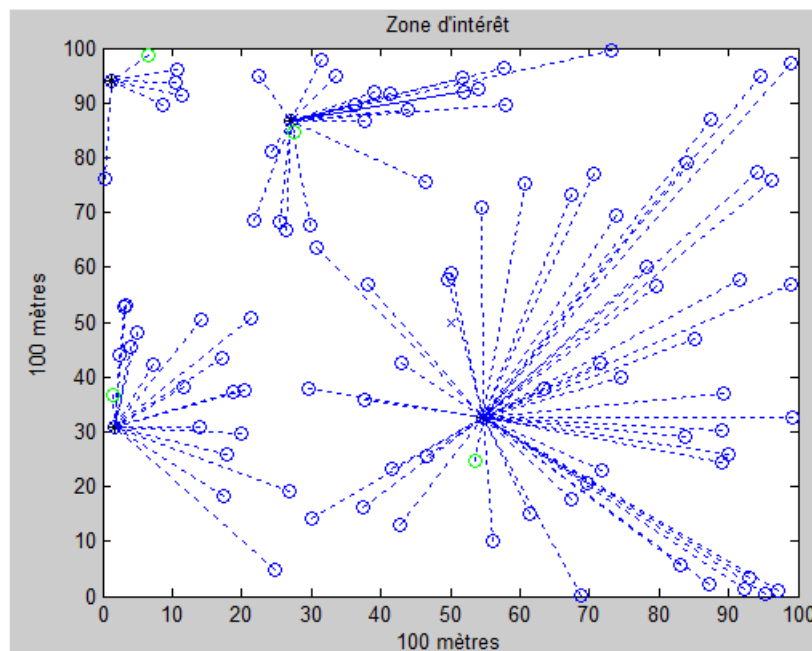


FIGURE 4.2 – Election des CH et les nœuds coopératifs et création des clusters associés

Les cercles en bleu représentent les nœuds capteurs déployés aléatoirement et la croix au milieu du réseau représente la station de base.

Les cercles en bleu avec un plus au milieu sont les clusters-heads, les lignes discontinues en bleu représentent les nœuds associés au CHs, les cercles en vert représentent les nœuds coopératifs.

Le CH sélectionnera un nœud en tant que nœud coopératif, en se basant sur la puissance du signal, qui envoie simultanément les données avec le CH vers la SB. Cette transmission se fait avec la technique STBC.

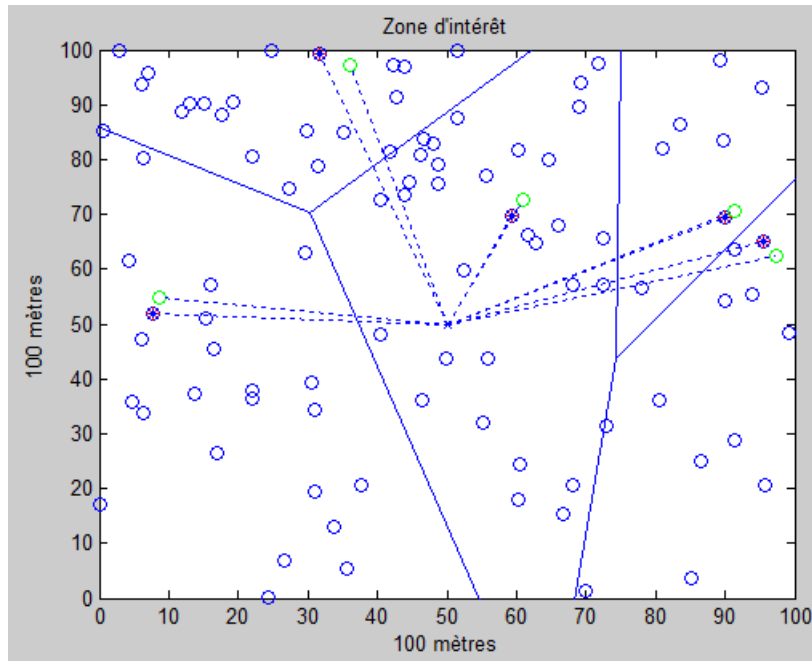


FIGURE 4.3 – Transmission de données vers la station de base

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

Pour évaluer les performances de ce protocole, 100 nœuds capteurs sont aléatoirement déployés sur une zone d'intérêt de 100 m^2 de surface. La station de base (SB) est positionnée aux coordonnées (50m, 175m).

a) Les paramètres de simulation

Les paramètres de simulation utilisés dans le protocole EB-LEACH-MIMO sont comme suit :

- Energie initiale :elle est fixée à 0.5 joule.
- Probabilité optimale de l'élection des CHs :elle est égale à 0.05%.
- E_{elec} (énergie consommée par le circuit électronique) : elle est fixée à 50 nJ/bit.
- E_{amp} (énergie d'amplification) : elle est fixée à 100 pJ/bit/ m^2 .
- E_{Ag} (énergie d'agrégation) : elle est égale à 5 nJ.
- La taille des paquets : elle est fixée à 4000 bits.
- La portée des capteurs : elle est égale 20 mètres.

- K_{opt} :le nombre de cluster :5.

- $\lambda=200$.

- M_t : le nombre de nœuds coopératifs en émission qui est fixée à 2.

b) résultats de simulation :

La figure suivante montre la durée de vie du réseau en fonction du nombre de round par rapport au nombre de nœuds encore en vie.

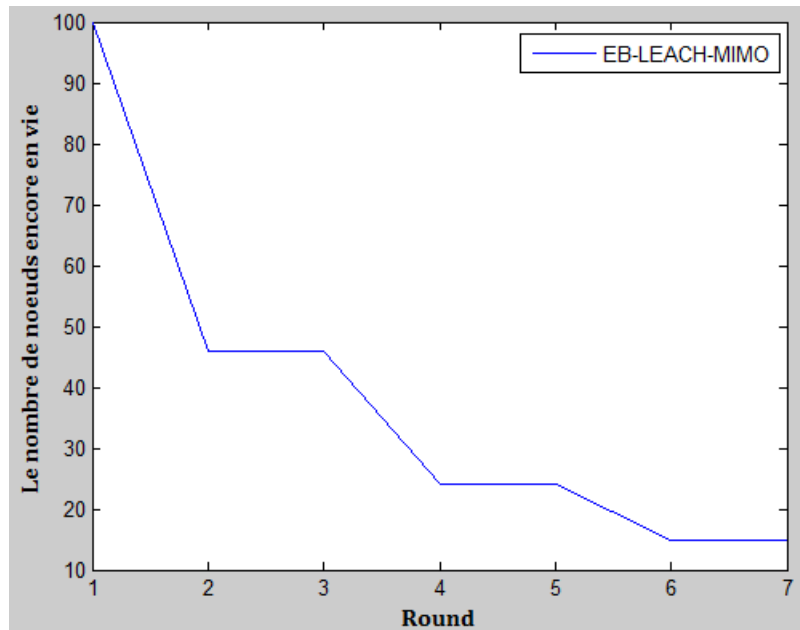


FIGURE 4.4 – La durée de vie du réseau du protocole.

On remarque que le nombre de nœuds en vie diminue dès que le nombre de round augmente, après 7 round le nombre de nœuds ne dépassent pas la vingtaine.Ceci est dû à l'augmentation du nombre de round.

4.3.3 Conclusion

Un protocole EB-LEACH-MIMO assure le prolongement de la durée de vie du réseau, il optimise la sélection des clusters-heads en tenant compte de leurs positions et de l'énergie résiduelle du nœud ainsi que la méthode de partition hexagonale du réseau,il aide à la sélection optimale des nœuds coopératifs dont le but d'assurer la transmission des données à la SB.

Le protocole permet d'équilibrer la consommation d'énergie des nœuds dans un cluster dû à la partition hexagonale du réseau.

Conclusion générale

Au cours de ces dernières années, les réseaux de capteurs sans fil ont connu un meilleur essor dans de nombreux domaines. Cela est principalement attribué à l'ampleur sans précédent des possibilités qu'offre cette technologie. Toutefois, les réseaux de capteurs doivent aussi faire face à d'importants défis de conception en raison de leur dépendance à l'égard d'une énergie limitée fournie par une batterie. L'énergie est une ressource critique et constitue souvent un obstacle majeur au déploiement des réseaux de capteurs. D'autre part, les systèmes MIMO se présentent comme une solution intéressante pour répondre aux besoins des communications sans fil dans différents domaines. Ils proposent des améliorations notables pour les transmissions dans des canaux à évanouissements en termes de débit et de robustesse.

- EB-LEACH-MIMO améliore l'efficacité énergétique du réseau et équilibre la consommation d'énergie, prolonge la durée de vie du réseau, réduit fortement la dissipation d'énergie pour les données de transmissions dans un cluster.

Dans ce mémoire, après une présentation des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil et les techniques MIMO, nous avons effectué une étude comparative de quelques techniques MIMO proposées pour les réseaux de capteurs sans fil. Par la suite, nous avons présenté les résultats du déploiement du réseau présenté dans l'article " The Energy Efficient Cooperative MIMO Technique for Hierarchical Clustering Protocol " et le résultat de simulation obtenus en implémentant la technique EB-LEACH-MIMO présentée dans l'article " A Joint Energy-balanced Organizing Scheme with Hexagon-Clustered Algorithm and Cooperative mimo for WSNS" .Le tout étant d'évaluer leurs performances en terme d'énergie.

En guise de perspective, nous souhaitons évaluer les performances d'autres techniques MIMO proposée pour les RCSFs et ce en utilisant le même scénario de simulation afin de pouvoir les comparer et mettre l'accent sur les points forts et points faibles de chaque technique.

Bibliographie

- [1] Y.Younes, Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs, Mémoire de magister en systèmes informatiques, Université MOULOUD MAMMERI, Tizi-ouzou, 2012.
- [2] https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_de_capteurs_sans_fil#Logiciels
- [3] <https://fr.wikipedia.org/wiki/TinyO>
- [4] S.Athemani, Protocole de sécurité pour les réseaux de capteurs sans fil, Mémoire de magister, Université Hadj Lakhedar, batna, 2010.
- [5] M.samia, O.souhila, Implémentation et évaluation des schémas de routage sur une plateforme réelle de réseaux de capteurs sans fil, Mémoire de master, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2014.
- [6] D.karakolah. Conception de prototypage d'un récepteur itératif pour les systèmes de transmission MIMO avec pré-codage linéaire. Thèse de doctorat, université Bretagne-sud, France, 2009.
- [7] M.Ben Zid .Emploi de technique de traitement de signal MIMO pour des applications dédiées réseaux de capteurs sans fil. Thèse de doctorat, Université de grenoble, France, 2012.
- [8] T-D.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 ,France, 2007
- [9] A.Rachini, Etude de la synchronisation temporelle dans les systèmes MIMO-OFDM appliqués aux réseaux mobiles, 2014.
- [10] L.COLLIN. Optimisation de systèmes multi antennes basée sur la distance minimale, l'Université de Bretagne Occidentale, 2002.
- [11] P.GRUYER, S.PAILLARD, Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM, Université de Bretagne, 2005.

-
- [12] 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.
- [13] S.Bouaziz,Réduction du PAPR du système OFDM-MIMO en 4G, UNIVERSITE FERHAT ABBAS
- [14] B.Vrigneau,Systèmes MIMO précodés optimisant la distance minimale :étude des performances et extension du nombre de voies,l'Université de Bretagne Occidentale,2006
- [15] G.Madi,Optimisation d'un réseau de capteurs par techniques MIMO coopératives. Applications possibles : Smart Grid, télédétection,Université de poitiers 2006.
- [16] 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.
- [17] <http://www.wimax-fr.com/>
- [18] <https://www.justaskgemalto.com/fr/que-veut-dire-lte/>
- [19] http://iutsa.unice.fr/~frati/wireless_LP/Wireless-ch14-MIMO_20802.11n-1.2.pdf
- [20] https://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_de_Viterbi
- [21] F.ABDLFATEH.Développement d'une bibliothèque de capteurs, Mémoire de Master,université de montpellier2,2008.
- [22] <https://fr.wikipedia.org/wiki/tinyOS>
- [23] J-M.RICHER, initiation à la bioinformatique,2006
- [24] I-F.Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. Computer Networks, 38(4) : pages 393–422, 2002.
- [25] M. MOHAMMEDI, L. MOULAI. "Proposition d'une stratégie MIMO (2×2) coopérative pour les réseaux de capteurs sans fil", Mémoire de master, Université A/MIRA de Béjaia, 2013.
- [26] W.MOKHTARI,Rapport sur les réseaux de capteurs,université de béjaia,2016.
- [27] S.EL ABDELLAOUI.Etude et analyse de la performance du système coopératif «MIMO-Virtuel» pour les réseaux de capteurs sans fil.Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ Rabat,2013.
- [28] Y.REBHI,M.MOKDAD, Implémentation d'un protocole de planification pour la collection de données agrégées dans un réseau de capteurs sans fil,mémoire de master, BLIDA, 2013.

-
- [29] S.MAAROUF,S.OUADAH ,Implémentation et évaluation des schéma de routage sur une plateforme réelle de réseau de capteurs sans fil,mémoire de master, 2014.
- [30] S.MOAD,la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil ,IFSIC-Rennes1,mémoire de master , 2008.
- [31] Matlab. <http://fr.mathworks.com/products/matlab/>.
- [32] K-K Pandey,A.Jain,R.Dekar,The Energy Efficient Cooperative MIMO Technique for Hierarchical Clustering Protocol,Volume 57– No.9, November 2012.
- [33] LEACH.[https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module RCSF 78.html](https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_78.html)
- [34] CSMA-CA.<https://techopedia.com/definition/1127/carrier-sense-multiple-accesswith-collision-avoidance-csmaca>
- [35] A.Irfan, M.Peng, W.Wang,Uniform Energy Consumption through Adaptive Optimal Selection of Cooperative MIMO Schemes in Wireless Sensor Networks
- [36] Q.Tanga,L.Dengb, Y.Qina, X.Lia, X.Yuea,A Joint Energy-balanced Organizing Scheme with Hexagon- Clustered Algorithm and Cooperative MIMO for WSNs ,2012.
- [37] N.Medhia, N.Sarmab,Mobility Aided Cooperative MIMO Transmission in Wireless Sensor Networks ,2012
- [38] A.Marco,M.Marinho, J-P C.L. da Costa, F.Antreichy, E-P de Freitas, A. Vinelk,Adaptive Communication and Cooperative MIMO Cluster Formation for Improved Lifetime in Wireless Sensor Networks ,2016.
- [39] K-K Pandey,N.Purohit,A.Agarwal,Efficient Clustering Technique for Cooperative Wireless Sensor Network, N_0 40-47,Novembre 2014.
- [40] N.Achir, M.Debbah, P.Muhlethaler,Massive MIMO Cooperative Communications for Wireless Sensor Networks : Throughput and Energy Efficiency Analysis,Décembre 2014.
- [41] [https://TDD \(télécommunications\) — Wikipédia.htm](https://TDD%20(t%C3%A9l%C3%A9communications)%20%E2%80%94%20Wikip%C3%A9dia.htm)
- [42] N.Mehwish,S. Qaisar,S.Lee,An Energy Efficient Cooperative Hierarchical MIMO Clustering Scheme forWireless Sensor Networks,2012.
- [43] D-N. NGUYEN,M-KRUNZ,A Cooperative MIMO Framework for Wireless Sensor Networks.

Résumé

Le but de ce travail est de faire une étude comparative des différentes techniques MIMO (Multiple Input Multiple Output) pour les réseaux de capteurs sans fil. Après une présentation de quelques techniques MIMO, nous avons fourni les résultats de la simulation du protocole EB-LEACH-MIMO afin d'évaluer ces performances.

Ce protocole permet d'équilibrer la consommation d'énergie des nœuds dans un cluster du à la partition hexagonale du réseau.

Mots clés : Réseau de capteurs sans fil, les MIMOs ,Economie d'énergie, simulation, Matlab.

Abstract

The aim of this work is to make a comparative study of different techniques MIMO (Multiple Input Multiple Output) for Wireless Sensor Networks.

After a presentation of some MIMO techniques, we have provided the results of the simulation of the protocol EB-LEACH-MIMO in order to evaluate these performance.

This protocol balances the energy consumption of nodes in a cluster from the hexagonal partition of the network.

Keywords : WSNs, MIMO, Energy saving, simulation, Matlab.