

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

Université A/Mira de Béjaïa

Faculté des Sciences Exactes

Département d'Informatique



Mémoire de fin de cycle
en vue d'obtention du diplôme de master recherche en informatique
spécialité : Réseaux et systèmes distribués

Thème

La diffusion dans les réseaux de capteurs sans fil avec
économie d'énergie.

Présenté par

M^{elle} LOUALIA Sabrina

M^{elle} RACHDI Nabila

Jury :

Promoteur M^{lle} BOULFEKHAR Samra

Président M^{lle} REBOUH Nadjette

Examineur M^{lle} TASSOULT Nadia

Examineur M^{me} BACHIRI Lina

Promotion 2012/2013

Remerciements

Nous remercions avant tout Dieu pour nous avoir permis de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier M^{lle} BOULFEKHAR Samra, notre promotrice, pour son aide, ses conseils et ses encouragements qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous remercions aussi les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail et de nous faire part de leurs remarques pertinentes.

Un grand merci à M^r CHARFAOUI Mouloud et M^r ATMANI Mouloud pour leur aide qui nous a été précieuse.

Nous exprimons notre plus grande gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

À tous ceux que j'aime.

RACHDI Nabila

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents
que j'aime énormément, ceux
qui ont tant fait pour moi et en qui je puise
ma force
À mon frère et mes sœurs qui ont
toujours su être présent pour moi
À tous les autres membres de ma famille
À mes amis sur qui j'ai toujours pu
compter
À toutes les personnes qui m'ont soutenu
et aidé.

LOUALIA Sabrina

Liste des abréviations

ADC : Analog to Digital Converter.

BALR : Broadcast Algorithme with Less Redandancy.

BDS : Broadcasting based on Distance Scheme.

BOPP : BrOadcast Power Preserving protocol.

BSP : Bulk Synchronous Parallel.

CDS : Connexe Dominating Set.

CDSE : Connected Dominating Set-Energy.

CDSEP : Connected Dominating Set-Energy Protocol.

CH : Cluster-Head.

CI : Check Interval.

DNs : Dominating Nodes.

eRDS-MPR : extended Realistic Dominating Set - MultiPoint Relais.

IM : Interconnection Messages.

ISM : Industrial Scientific Medical bands.

LBNL : Lawrence Berkeley National Laboratory.

LEACH : Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy.

LNSM : Log-Normal Schadowing Model.

MAC : Media Access Control.

Matlab : Matrix laboratory.

MFP : Micro Frame Preamble.

MHz : Mega Hertz.

MIPS : Million of Instructions Per Second.

ML2B : Maximum Lifetime Loclzized Broadcast.

MPR : MultiPoints Relais.

MTE : Minimum Transmission Energy.

NAM : Network Animator.

NES : Neighbor Elimination Scheme.

NS2 : Network Simulator.
OSI : Open System Interconnexion.
OPNET : Optimum **NET**work **P**erformance.
PFSQ : Pump Slowly **F**etch **Q**uickly.
P-GRAB : Probabilistic **G**radient **B**roadcast **A**lgorithme.
QoS : Quality of **S**ervice.
RAD : Random **A**ssessment **D**elay.
RAM : Random **A**ccess **M**emory.
RCSFs :Réseaux de **C**apteurs **S**ans **F**ils.
RDS-MPR : Realistic **D**ominating **S**et - **M**ulti**P**oint **R**elais.
ROM : Read **O**nly **M**emory.
RW : Realistic **W**eight.
SMACS : Self-organizing **M**edium **A**ccess **C**ontrol for **S**ensors networks.
SMECN : Small **M**inimum **E**nergy **C**ommunication network.
SMP : Sensor **M**anagement **P**rotocol.
TCP/IP : **T**ransmission **C**ontrol **P**rotocol/**I**nternet **P**rotocol.
WSN : **W**ireless **S**ensor **N**etworks.

Table des matières

Liste des abréviations	i
Table des Matières	iii
Liste des tableaux	vi
Table des figures	vii
Introduction générale	1
1 Les réseaux de capteurs sans fil	4
1.1 Introduction	4
1.2 Les réseaux de capteurs sans fil	5
1.2.1 Définitions	5
1.2.2 Architectures	5
1.2.2.1 Architecture d'un capteur	5
1.2.2.2 Architecture d'un réseau de capteurs	7
1.2.3 Le fonctionnement d'un réseau de capteurs	8
1.2.4 Les caractéristiques d'un réseau de capteurs	8
1.2.5 Les domaines d'application des RCSFs	10
1.2.6 La communication dans les réseaux de capteurs sans fil	11
1.2.6.1 Pile protocolaire (<i>modèle en couches</i>)	11
1.2.6.2 Les niveaux intégrés dans la pile protocolaire	13
1.2.7 Les différents facteurs de conception	14
1.3 Conclusion	17
2 Etude critique des protocoles de diffusion dans les réseaux de capteurs sans fil	18

2.1	Introduction	18
2.2	Notion de diffusion	18
2.3	Les cas d'utilisation de la diffusion	19
2.3.1	Diffusion lors de clusterisation	19
2.3.2	Diffusion lors du routage	20
2.3.3	Diffusion lors de découverte de voisinage	21
2.4	Techniques de diffusion existantes	21
2.4.1	La diffusion aveugle	21
2.4.2	Diffusion avec connaissance de voisinage et sans ajustement de portée	22
2.4.2.1	Diffusion basée sur les relais multipoints (<i>MPR</i>)	22
2.4.2.2	Diffusion basée sur les ensembles dominants connexes (<i>CDS</i>)	25
2.4.2.3	Diffusion avec <i>MPR</i> basée sur les ensembles dominants connexes	28
2.4.2.4	Diffusion basée sur le mécanisme d'élimination de voisins (<i>NES</i>)	30
2.4.3	Diffusion basée sur le Duty Cycle	31
2.4.4	Diffusion sans connaissance de voisinage	33
2.4.4.1	Méthodes probabiliste	33
2.4.4.2	Méthode basée sur la distance	33
2.4.4.3	Méthode basée sur la géo-localisation	34
2.4.4.4	Diffusion basée sur un compteur	35
2.4.5	Protocole hybride	35
2.4.6	Diffusion avec ajustement de la portée et connaissance de voisinage	37
2.5	Classification des techniques de diffusion étudiées	38
2.6	Etude comparative entre les techniques de diffusion étudiées	39
2.6.1	Taux de diffusion	39
2.6.2	Consommation d'énergie	39
2.6.3	Nombre de messages rediffusés	39
2.6.4	Temps de réponse	39
2.6.5	Perte de paquets	39
2.7	Conclusion	40
3	Protocole de diffusion <i>MPR</i> avec ajustement de la portée (<i>MPR-r/R</i>)	41
3.1	Introduction	41
3.2	Motivations	41
3.3	Le protocole <i>MPR</i>	42
3.4	Le protocole <i>MPR-r/R</i>	42
3.4.1	Idée de base	42
3.4.2	Phase de découverte de voisinage	43

3.4.3	Description détaillée du protocole MPR-r/R	44
3.4.3.1	Protocole MPR-r	44
3.4.3.2	Protocole MPR-R	46
3.4.4	Pseudo algorithme	48
3.4.5	Organigramme de fonctionnement	49
3.5	Exemple	51
3.6	Conclusion	60
4	Evaluation de performances du protocole MPR-r/R	62
4.1	Introduction	62
4.2	Simulateurs de réseau de capteurs	62
4.3	Le choix de l’environnement de simulation	63
4.4	Les étapes de simulation	63
4.4.1	Initialisation des variables de simulation	64
4.4.2	Déploiement du réseau	65
4.4.3	Découverte de voisinage	66
4.4.4	Création de l’échéancier d’évènements	66
4.4.5	Modèle de consommation d’énergie	66
4.4.6	Application des algorithmes de diffusion	66
4.4.7	Résultats de la simulation	67
4.5	Evaluation de performances de protocole MPT-r/R	67
4.5.1	Les métriques de performances du protocole MPR-r/R	67
4.5.1.1	Le nombre de nœuds relais	67
4.5.1.2	L’énergie résiduelle	67
4.5.1.3	L’énergie moyenne consommée	68
4.5.2	Discussion des résultats de simulation	68
4.6	Conclusion	71
	Bibliographie	viii
	Résumé	

Liste des tableaux

2.1	Classification des différents protocoles de diffusion dans les réseaux de capteurs.	38
2.2	Comparaison entre les différents protocoles de diffusions dans les réseaux de capteurs.	40
3.1	Tableau des notations utilisées dans le protocole MPR-r/R.	44
3.2	Résultats de la phase de découverte de voisins.	52
3.3	Calcul du poids pour les voisins de b.	53
3.4	Calcul du poids pour les voisins de p.	55
3.5	Calcul du poids pour les voisins de e.	55
3.6	Calcul du poids pour les voisins de a.	56
3.7	Calcul du poids pour les voisins de i.	57
3.8	Calcul du poids pour les voisins de q.	58
3.9	Calcul du poids pour les voisins de g.	58
3.10	Calcul du poids pour les voisins de J.	59
3.11	Calcul du poids pour les voisins de k.	60
4.1	Les paramètres de simulation utilisés.	65

Table des figures

1.1	Exemples de capteurs [9].	5
1.2	Architecture d'un capteur.	7
1.3	Architecture d'un réseau de capteurs [8].	8
1.4	La pile protocolaire des réseaux de capteurs [3].	12
1.5	Consommation d'énergie en captage, traitement et transmission [32].	17
2.1	L'ensemble $\{f, g\}$ nœuds relais du nœud d.	23
3.1	Pavage carré connexe de la surface S pour deux valeurs différentes de r.	46
3.2	Consommation énergétique d'une diffusion ($\alpha = 4$, $C_e = 10^8$ et $S = 10000$).	47
3.3	Organigramme de fonctionnement du protocole MPR-r/R.	50
3.4	Exemple de réseau sans fil présenté par un graphe non orienté.	51
3.5	Le nœud b diffuse le message M1.	53
3.6	Les nœuds p et e diffusent.	54
3.7	Les nœuds a, i, q et g diffusent.	56
3.8	Les nœuds j et k diffusent.	59
4.1	Les étapes de la simulation.	64
4.2	Le déploiement des nœuds capteurs dans la zone de captage.	65
4.3	Modèle de consommation d'énergie.	67
4.4	Consommation énergétique selon la portée de transmission.	68
4.5	L'énergie résiduelle suivant le nombre d'évènements.	69
4.6	L'énergie moyenne consommée suivant le nombre d'évènements.	69
4.7	Le nombre de nœuds relais suivant le nombre d'évènement.	70

Introduction générale

Depuis leur création, les réseaux de communication sans fil n'ont cessé de connaître un succès croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles. Grâce à leurs divers avantages, cette technologie a pu s'instaurer comme acteur incontournable dans les architectures réseaux actuelles. En effet, le média hertzien offre des propriétés uniques, qui peuvent être résumées en trois points : la facilité du déploiement, l'ubiquité de l'information et le coût réduit d'installation. Au cours de son évolution, le paradigme sans fil a vu naître diverses architectures dérivées, telles que : les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fils et autres.

Durant cette dernière décennie, une nouvelle architecture a vu le jour : les réseaux de capteurs sans fil. Ce type de réseaux résulte d'une fusion de deux pôles de l'informatique moderne : les systèmes embarqués et les communications sans fil. Un réseau de capteurs sans fil (*RCSF*), ou Wireless Sensor Network (*WSN*), est composé d'un ensemble d'unités de traitements embarquées, appelées "capteurs", communiquant via des liens sans fil. Le but général d'un RCSF est la collecte d'un ensemble de paramètres de l'environnement entourant les capteurs, tel que la température ou la pression de l'atmosphère, afin de les acheminer vers des points de traitement. Les RCSF sont considérés comme étant les successeurs des réseaux ad hoc. En effet, les RCSF partagent avec les réseaux Ad hoc (Mobile Ad hoc Network en anglais *MANET*) plusieurs propriétés en commun, telles que l'absence d'infrastructure et les communications sans fil. Les RCSF ont su attirer un nombre croissant d'industriels, vu leur réalisme et leur apport concret. Le besoin d'un suivi continu d'un environnement donné est assez courant dans diverses activités de la société. Les processus industriels, les applications militaires, les applications environnementales, ainsi que l'agriculture de précision ne sont que quelques exemples d'une panoplie vaste et variée d'applications possibles du suivi continu offert par les RCSF. Grâce à ce potentiel riche en applications, les RCSF ont su se démarquer des différents réseaux connus auparavant.

Cependant, malgré leurs apports dans ces différents domaines, les RCSFs sont affectés par plusieurs contraintes, la plus pesante est sans doute leur énergie limitée. En effet, vu la petite taille des capteurs composant ces réseaux, leurs batteries sont réduites et sont souvent

irremplaçable à cause de leur déploiement dans des environnements qui peuvent être hostiles. C'est pourquoi, des protocoles ne cessent d'être mis en œuvre pour assurer l'efficacité de la consommation énergétique.

Objectifs et motivations

La diffusion dans les réseaux de capteurs sans fil est un processus très important, du fait qu'il permet la réception d'une information au niveau de chaque nœud. En contre partie, c'est un processus très couteux en énergie à cause des nombreuses communications. Vu que les nœuds capteurs utilisent une batterie limitée et qu'elle est en générale irremplaçable, la conservation de cette énergie doit être prise en compte. L'une des solutions est d'utiliser des protocoles de diffusion à économie d'énergie.

Plusieurs protocoles de diffusion ont été proposés dans la littérature. Notre objectif est la mise en œuvre d'un protocole de diffusion pour les RCSFs qui minimise la consommation énergétique, et ainsi maximiser la durée de vie du réseau. Notre protocole doit être efficace tout en répondant aux contraintes de ce type de réseaux, et doit répondre aux caractéristiques suivantes :

- Le protocole doit minimiser la consommation énergétique des nœuds capteurs et donc de tout le réseau.
- Le protocole doit réduire au minimum le nombre de nœuds relais et donc de messages ;
- Le protocole doit permettre la mise à l'échelle et fonctionner efficacement pour des réseaux de n'importe quelle taille.

Pour cerner ces objectifs, nous allons proposer un protocole de diffusion qui se base sur le principe des MPRs et en ajustant la portée de transmission. Cette portée étant considérée comme optimale permet de réduire la consommation d'énergie des nœuds du réseau.

Structure du mémoire

Pour mieux cerner les enjeux de notre étude, nous avons structuré notre mémoire en quatre chapitres : Le premier chapitre présente des généralités sur les réseaux de capteur sans fil, leurs caractéristiques, leurs domaines d'application ainsi que leur architecture de communication.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des différents protocoles de diffusion minimisant la consommation d'énergie dans les RCSFs. Nous présentons une étude critique de différents protocoles de diffusion proposés dans la littérature ainsi qu'une classification et une comparaison de ces derniers.

Le troisième chapitre présente les détails de la solution MPR- (r/R) que nous avons proposée pour répondre à la problématique de la conservation d'énergie dans les RCSFs.

Dans le quatrième chapitre, nous illustrons les différents résultats de simulation obtenus en utilisant Matlab, avec une comparaison des performances de MPR- (r/R) avec celles de MPR. Notre mémoire se termine avec une conclusion générale et des perspectives que nous voulons réaliser prochainement.

Les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

L'essor des technologies sans fil offre aujourd'hui de nouvelles perspectives dans le domaine des télécommunications. L'environnement sans fils permet aux utilisateurs d'accéder et de manipuler des informations à travers des unités de calculs mobiles. En effet, les réseaux sans fil offrent une grande flexibilité d'emploi. En particulier, ils permettent la mise en réseaux de sites dont le câblage serait trop onéreux à réaliser dans leur totalité, voir même impossible dans certains cas. Ces réseaux peuvent être classés en deux catégories : les réseaux avec infrastructure, et les réseaux Ad hoc.

Les avancées techniques et technologiques réalisées aux cours de ces dernières décennies ont permis le développement d'un nouveau type de réseaux Ad hoc : les réseaux de capteurs sans fil (*RCSFs*) ou plus connu sous le sigle Wireless Sensor Network (*WSN*). Les RCSFs sont basés sur l'effort collaboratif d'un grand nombre de nœuds communément appelés capteurs qui opèrent d'une manière autonome et complètement transparente pour l'utilisateur. Le rôle de ces derniers consiste à observer des phénomènes physiques tels que la température, la pression ou encore la luminosité, de capter des données de les traiter et enfin d'acheminer le résultat du traitement via un support de transmission sans fil vers une station puits.

Dans ce premier chapitre, des notions de bases sur les réseaux de capteurs sans fil seront présentées, notamment leurs architectures, leurs caractéristiques, leurs domaines d'application et leur pile protocolaire seront détaillées.

1.2 Les réseaux de capteurs sans fil

Le réseau de capteurs sans fil est un type particulier des réseaux Ad- Hoc, dans ce qui suit nous aborderons les différents concepts liés à ce type de réseaux.

1.2.1 Définitions

Dans le domaine des réseaux, les mots : capteur et réseau de capteurs sans fils sont souvent utilisés, mais que signifient-ils en réalité ?

- **Le capteur** : est un système ou organe qui sert à détecter un phénomène physique ou chimique, afin de prélever des informations comme la pression, la température et les vibrations qui seront élaborées à une autre grandeur de nature différente (*très souvent électrique*) utilisable à des fins de mesures ou de commandes [4, 31].

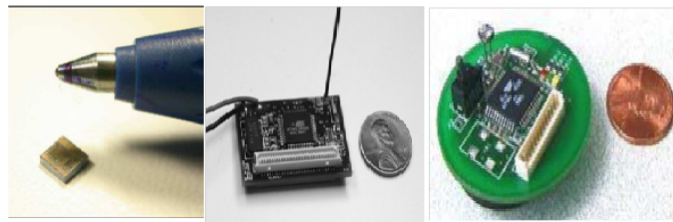


FIGURE 1.1 – Exemples de capteurs [9].

- **Réseau de capteurs sans fil** : c'est un ensemble de nœuds capteurs dont le nombre varie de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers voire des milliards. Les capteurs ne sont pas intégrés à une quelconque architecture de communication pré-existante, mais ils communiquent à l'aide d'un réseau Ad Hoc sans fil. L'alimentation électrique de chaque capteur est assurée par une batterie individuelle dont la consommation pour la communication et le calcul lié au traitement de l'information doit être optimisée [8].

1.2.2 Architectures

Un capteur et un réseau de capteurs ont des architectures bien déterminées et qui leurs sont propres.

1.2.2.1 Architecture d'un capteur

Un capteur est doté de deux architectures : matérielle et logicielle. La première est composée de ce qui suit :

- **Unité de capture (*perception*)** : cette unité se décompose en deux sous unités : la première dite de "Capture" est chargée de capter et/ou de mesurer des grandeurs physiques à partir d'un objet cible. Elle communique les informations recueillies sous forme analogique au convertisseur analogique-numérique (ADC pour Analog to Digital Converter) qui représente la deuxième sous unité. Cette dernière convertit l'information en signaux numériques et les transmet à l'unité de traitement [2].
- **Unité de traitement** : les micro-contrôleurs utilisés dans le cadre des réseaux de capteurs sont à faible consommation d'énergie. Leurs fréquences sont assez faibles, moins de 10 MHz pour une consommation de l'ordre de 1 mW. Une autre caractéristique est la taille de leur mémoire vive qui est de l'ordre de 10 Ko de RAM pour les données et de 10 Ko de ROM pour les programmes. Cette mémoire consomme la majeure partie de l'énergie allouée au microcontrôleur, c'est pourquoi on lui adjoint souvent de la mémoire flash moins coûteuse en énergie. Autre que le traitement des données, le micro-contrôleur commande également toutes les autres unités, notamment le système de transmission [14, 3].
- **Unité de communication** : cette unité gère la connexion d'un nœud au réseau en effectuant toutes les émissions et réceptions des données sur le medium sans fil [2].
- **Unité de contrôle d'énergie** : un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique (*généralement une batterie*) pour alimenter tous ses composants. Cependant, en conséquence de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée et est généralement irremplaçable. Dès lors, l'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs, puisqu'elle influence directement sur la durée de vie des micro-capteurs, voire du réseau en entier. L'unité de contrôle d'énergie constitue donc l'un des systèmes les plus importants. Elle est responsable de répartir l'énergie disponible aux autres modules et de réduire les dépenses en mettant en veille les composants inactifs par exemple.
Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules solaires, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau [12].

L'architecture logicielle quand à elle, se focalise sur le système d'exploitation utilisé dans un capteur. Plusieurs systèmes d'exploitation ont été développés pour répondre aux contraintes particulières des réseaux de capteurs. Celui qui s'est imposé comme référence est celui développé à l'Université de Berkeley nommé TinyOS. C'est, de loin, le système d'exploitation le plus utilisé pour les réseaux de capteurs sans fils. c'est un système d'exploitation open source conçu pour

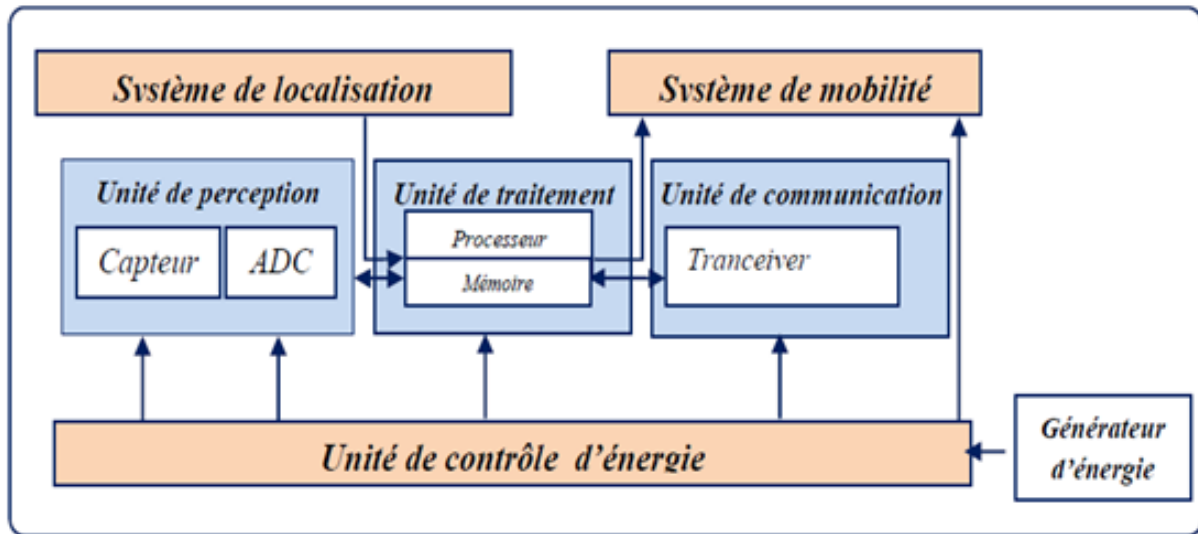


FIGURE 1.2 – Architecture d'un capteur.

les capteurs sans fils, basé sur une architecture à base de modules : pilotes pour des capteurs, des protocoles réseau et des services distribués. Ces composants sont programmés en nesC, un langage de programmation dérivé du C adapté aux faibles ressources physiques des capteurs [37].

1.2.2.2 Architecture d'un réseau de capteurs

Un réseau de capteurs est constitué essentiellement : de plusieurs nœuds capteurs, un nœud-puits et un centre de traitement de données.

- **Nœuds** : ceux sont des capteurs, leur type, leur architecture et leur disposition géographique dépendent de l'exigence de l'application en question. Leur énergie est souvent limitée puisqu'ils sont alimentés par des piles.
- **Nœud-puit (*Sink*)** : c'est un nœud particulier du réseau. Il est chargé de la collecte de données issues des différents nœuds du réseau. Il doit être toujours actif puisque l'arrivée des informations est aléatoire. C'est pour quoi son énergie doit être illimitée. Dans un réseau de capteur sans fils, plus ou moins large et à charge un peu élevée, on peut trouver deux nœuds-puits ou plus pour alléger la charge.
- **Centre de traitement de données** : c'est le centre vers lequel les données collectées par le nœud-puits sont envoyées. Ce centre a le rôle de regrouper les données issues des nœuds et les traiter de façon à extraire l'information utile et exploitable. Le centre de

traitement peut être éloigné du nœud-puits, alors les données doivent être transférées à travers un autre réseau, c'est pour quoi on introduit une passerelle entre ce nœud et le réseau de transfert pour adapter le type de données au type de canal.

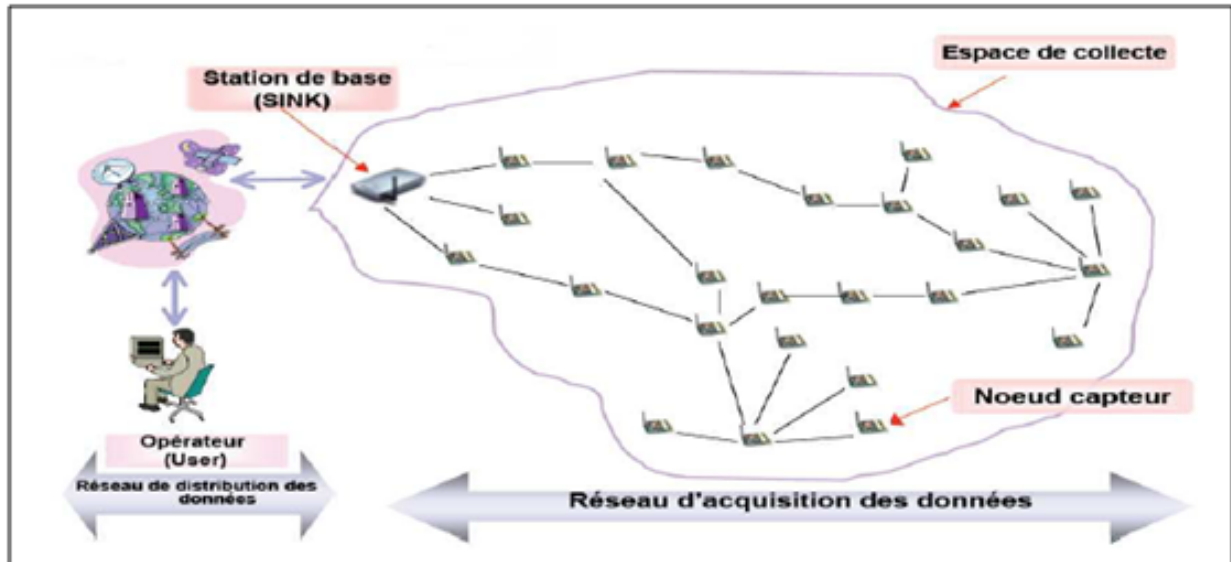


FIGURE 1.3 – Architecture d'un réseau de capteurs [8].

1.2.3 Le fonctionnement d'un réseau de capteurs

Dans les réseaux de capteurs sans fils les données captées par les nœuds sont acheminées grâce à un routage multi-sauts à un nœud considéré comme un "point de collecte". Ce dernier peut être connecté à l'utilisateur du réseau via Internet, satellite ou un autre système. L'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises et récolter les données environnementales captées par le biais du nœud-puits.

1.2.4 Les caractéristiques d'un réseau de capteurs

Les réseaux de capteurs sans fil sont apparentés aux réseaux ad hoc. Ces deux types de réseaux ont de nombreux points communs comme l'absence d'infrastructure, l'autonomie et l'utilisation des ondes radio pour la communication, mais les réseaux de capteurs sans fil ont des caractéristiques bien spécifiques que nous allons illustrer dans ce qui suit.

- **Contrainte d'énergie :** dans les réseaux ad hoc, la consommation d'énergie a été considérée comme un facteur déterminant mais pas primordial car les ressources énergétiques

peuvent être remplacées par l'utilisateur. Ces réseaux se focalisent plus sur la qualité de service (en anglais, Quality of Service : *QoS*) que sur la minimisation de la consommation d'énergie. Par contre, dans les réseaux de capteurs sans fils, la consommation d'énergie est une contrainte très importante puisque généralement les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles. Ainsi, il est difficile voir impossible de remplacer les batteries après leur épuisement. De ce fait, la consommation d'énergie au niveau des capteurs a une grande influence sur la durée de vie du réseau en entier [3, 21].

- **Densité de déploiement** : le nombre de nœuds capteurs dans un réseau de capteurs sans fils peut atteindre des millions, cela pour permettre une meilleure surveillance. De plus, si plusieurs nœuds capteurs se retrouvent dans une région, un nœud défaillant pourra être remplacé par un autre. Cependant, la densité de déploiement donne naissance à des challenges pour la communication entre les nœuds. En effet, elle provoque des collisions ou des endommagements des paquets transmis.
- **Auto organisation du réseau et la dynamisation de la topologie** : ceci peut être nécessaire, vu la grande densité des nœuds capteurs et leur déploiement dans des zones d'intérêts critiques où aucune intervention humaine ne peut être possible pour assurer leur organisation. Et donc, les nœuds peuvent échouer (*par manque d'énergie ou destruction physique*), comme de nouveaux nœuds peuvent rejoindre le réseau. Par conséquent, le réseau doit être capable de s'auto-organiser et de se modifier périodiquement de sorte qu'il puisse s'adapter aux changements de la topologie tout en assurant son fonctionnement [13].
- **Scalabilité** : le nombre de capteurs dans un réseau peut atteindre des centaines ou des milliers (*selon l'application*).
- **Sécurité limitée** : Les principales caractéristiques limitées des réseaux de capteurs sans fils rendent la sécurité très difficile à assurer. En effet, étant basés sur un déploiement dans des environnements hostiles, les réseaux de capteurs sont plus sensibles aux attaques physiques. En plus, la communication sans fil est plus vulnérable que les liaisons filaires. Quiconque, possédant un récepteur adéquat, peut potentiellement écouter ou perturber les messages échangés. Notons que la puissance de calcul limitée des capteurs empêche l'utilisation des mécanismes cryptographiques résistants comme la cryptographie à clé publique [12].
- **Couverture limité** : Dans les réseaux de capteurs, chaque nœud obtient une certaine vue locale de l'environnement qui est limitée par sa portée. La couverture d'une vaste surface est composée de l'union de nombreuses couvertures de petite taille assurée par ces nœuds.
- **Connectivité** : la densité très élevée des nœuds dans les réseaux de capteurs sans fils exclue complètement leur isolement et augmente ainsi leur connectivité. Un réseau de capteurs est dit connecté si et seulement si, il existe au moins une route entre chaque

paire de noeuds [25]. La connectivité est affectée par les changements de la topologie du à la mobilité et la défaillance de ces noeuds.

1.2.5 Les domaines d'application des RCSFs

La taille de plus en plus réduite des micro-capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles (*thermique, optique, vibrations,...*) ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs sans fils d'envahir plusieurs domaines d'applications. En effet, les RCSFs peuvent se révéler très utiles dans de nombreuses applications lorsqu'il s'agit de collecter et de traiter des informations provenant de l'environnement. Parmi les domaines où ces réseaux peuvent offrir les meilleures contributions, nous citons :

- **Applications militaires** : comme dans le cas de plusieurs technologies, le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Comme exemple d'application dans ce domaine, on peut penser à un réseau de capteurs déployé sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller toutes les activités des forces ennemies, ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (*détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations*) [9].
- **Applications environnementales** : la surveillance de l'environnement est un domaine où les réseaux de capteurs sans fil sont largement utilisés. L'application classique est la détection des désastres tels que les feux de forêts. Dans une telle application, plusieurs capteurs sont déployés afin d'alerter les secours, d'évaluer les risques et de prendre les mesures nécessaires. Des capteurs peuvent également être déployés sur un terrain à des fins agricoles ou pour la surveillance des environnements hostiles tels que les volcans ou les régions toxiques.
- **Applications médicales** : en médecine, les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau : (*surveillance de glycémie, détection de cancers..etc*). Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelque maladies en effectuant des mesures physiologique et cela à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche particulière.
- **Applications dans la sécurité** : l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter des fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou un vieillissement de la structure. Avec une activation

périodique de ces capteurs, le système peut fonctionner durant des années, voir des décennies.

- **La domotique** : comme la technologie progresse, les nœuds capteurs intelligents et actionneurs peuvent être dissimulés dans des appareils tels que des aspirateurs, micro-ondes, un réfrigérateur ou des magnétoscopes [29]. Ces nœuds de détection à l'intérieur des dispositifs à usage domestique, peuvent interagir entre eux et avec le réseau externe par l'intermédiaire de l'Internet ou par satellite. Ils permettent aux utilisateurs finaux de gérer les périphériques à domicile localement et à distance plus facilement [3].
- **Applications commercial** : il est possible d'intégrer des nœuds capteurs au processus de stockage et de livraison. Le réseau ainsi formé, pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un paquet, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la position actuelle du paquet. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettent de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré [9].

1.2.6 La communication dans les réseaux de capteurs sans fil

Dans les réseaux de capteurs, les nœuds doivent bien réagir avec l'environnement où ils sont placés. Ainsi, ils doivent permettre une communication multi sauts pour les données qui circulent dans la zone de capture. Pour cela, un modèle de communication est proposé par Ian et al. [3] dont le rôle principal est la standardisation de la communication entre les participants afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits (*logiciels ou matériels*) compatibles. Ce modèle combine l'énergie et le routage, intègre les données avec les protocoles réseaux et permet une communication efficace entre les différents nœuds à travers un medium sans fil [3].

1.2.6.1 Pile protocolaire (*modèle en couches*)

Par analogie au modèle Open System Interconnexion (*OSI*) des réseaux filaires, le modèle de communication utilisé dans les réseaux de capteurs comprend cinq couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI. Etant donné qu'il y a d'autres critères à prendre en compte dans les réseaux de capteurs cette pile est caractérisé par trois niveaux qui sont intégrés dans les protocoles des différentes couches (*figure 1.4*). Ces niveaux sont accessibles par toutes les couches de la pile. Il existe une interaction entre les différentes couches et les différents niveaux.

- **La couche application** : suivant les fonctionnalités des capteurs, différentes applica-

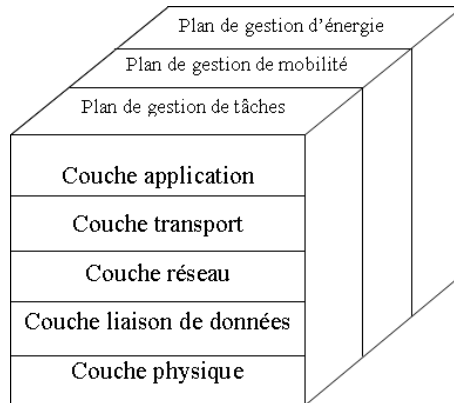


FIGURE 1.4 – La pile protocolaire des réseaux de capteurs [3].

tions peuvent être utilisées et implémentées sur cette couche. Elle fournit des mécanismes pour permettre à l'utilisateur d'interagir avec le réseau en lui fournissant des interfaces pour la création et la diffusion des requêtes et un moyen d'interpréter les réponses reçues [2]. Parmi les protocoles de cette couche nous citons : Sensor Management Protocol (*SMP*)

- **La couche transport** : elle sert à maintenir le flux de données en cas de nécessité dans les applications utilisées, particulièrement lors d'une connexion avec Internet. Comme exemple de protocoles fonctionnant dans cette couche il y a Pump Slowly Fetch Quickly (*PSFQ*)
- **La couche réseau** : dans un réseau de capteurs sans fil, les nœuds sont dispersés à forte densité pour observer un phénomène dans une région. Par conséquent, ils sont très proches les uns des autres. Pour assurer la propagation du signal sans effets de dégradation, les réseaux de capteurs utilisent une communication multi sauts. De plus, les nœuds doivent consommer moins d'énergie pour acheminer les données capturées dans le réseau au nœud puits, ce qui rend l'utilisation des protocoles de communication traditionnels des réseaux Ad hoc impraticables, notamment dans l'absence d'un adressage global vu le grand nombre de nœuds capteurs. Par conséquent, des protocoles adaptés doivent être mis en point pour assurer le bon routage et la bonne diffusion des données à travers ce réseau tout en tenant compte des contraintes imposées à savoir : la puissance de transmission, puissance de traitement et de stockage, ainsi que de l'énergie qui est une métrique très importante dans la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil. Parmi les protocoles fonctionnant dans cette couche, le protocole Small Minimum Energy Communication Network (*SMECN*) et le protocole Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (*LEACH*).

- **La couche liaison de données** : la couche liaison est à la charge du multiplexage de données, détection des trames, la gestion de l'accès au support de communication et le contrôle d'erreurs. Elle assure la fiabilité de la communication point à point et multipoint. Cependant, les protocoles Media Access Control (*MAC*) conventionnels ne sont pas directement applicables dans les réseaux de capteurs sans fil. Cette couche, exige l'utilisation de protocoles qui doivent être capables de réduire au minimum la collision avec l'émission des voisins et de minimiser les retransmissions. Plusieurs protocoles ont été conçu pour fonctionner au niveau de cette couche, parmi ces protocoles : Self-organizing Medium Access Control for Sensor Networks (*SMACS*).
- **La couche physique** : cette couche est responsable du canal de transmission, de la sélection de fréquences, de la génération des ondes porteuses, de la détection du signal et de la modulation. Deux médias peuvent être utilisés pour communiquer dans un réseau de capteurs sans fil : l'infrarouge et la radiofréquence [1]. Les systèmes infrarouges sont simples et peu coûteux. Ils fournissent un débit très élevé mais à une portée faible. Les infrarouges pénètrent à travers le verre, mais pas à travers les murs ou tout obstacle opaque. Par conséquent les communications ne peuvent se faire que dans la même pièce. Le principe de la radiofréquence est d'émettre des ondes électromagnétiques qui constituent la porteuse du signal à transmettre. Aujourd'hui, les réseaux de capteurs sans fil utilisent les bandes ISM (*des bandes utilisées pour la communication libres dans les domaines industriels scientifiques et médicaux*). L'avantage principal de ces bandes est qu'elles sont libres de toute licence d'utilisation. Toutefois, les systèmes basés sur la radiofréquence restent toujours limités par les contraintes de consommation d'énergie et les interférences nuisibles avec d'autres applications utilisant les mêmes bandes de fréquences.

1.2.6.2 Les niveaux intégrés dans la pile protocolaire

Trois niveaux supplémentaires sont intégrés dans la pile protocolaire : plan de gestion d'énergie, plan de gestion de mobilité et le plan de gestion de tâche [3].

- **Plan de gestion d'énergie** : cette partie gère la manière dont les nœuds utilisent leurs énergies. Généralement un capteur ne nécessite qu'une source énergétique limitée ($< 0.5 Ah, 1.2 V$). Comme la vie du nœud a une dépendance forte à l'égard de la vie de la batterie, il doit par conséquent contrôler et minimiser sa consommation d'énergie. Par exemple, après la réception d'un message, le capteur éteint son récepteur et se met en mode sommeil afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. En outre, si le niveau d'énergie atteint un seuil bas, le nœud diffuse à ses voisins une alerte pour les in-

former qu'il ne peut pas participer au routage. L'énergie restante est réservée à la capture.

- **Plan de gestion de mobilité** : il permet la détection et l'enregistrement des mouvements des nœuds capteurs afin de maintenir des informations sur leurs localisations et d'entretenir continuellement une route vers l'utilisateur final. Dans plusieurs cas les nœuds capteurs peuvent être mobiles suite à une configuration d'une nouvelle topologie ou bien par un changement d'emplacement désiré par l'utilisateur. Le système de gestion de mobilité doit être capable de commander les nœuds pour réaliser les mouvements nécessaires.
- **Plan de gestion de tâche** : ordonnance et balance les différentes tâches de capture de données dans une région spécifique. Il n'est pas nécessaire que tous les nœuds de cette région effectuent la tâche de capture en même temps ; certains nœuds exécutent cette tâche plus que d'autres selon leur niveau de batterie.

1.2.7 Les différents facteurs de conception

Plusieurs facteurs interviennent dans la conception des réseaux de capteurs sans fils. Parmi ces derniers on site :

- **La tolérance aux pannes** : la défaillance ou le blocage des nœuds dans un réseau de capteurs peut être engendré par plusieurs causes, notamment l'épuisement d'énergie, l'endommagement physique ou les interférences liées à l'environnement. La propriété de tolérance aux pannes est définie par l'habilité du réseau à maintenir ses fonctionnalités sans interruptions provoquées par la panne des capteurs. Elle vise donc à minimiser l'influence de ces pannes sur la tâche globale du réseau [2].
- **Passage à l'échelle (*Scalabilité*)** : le nombre de nœuds d'un réseau dépend de l'application à laquelle est destiné ce réseau. Il peut atteindre plusieurs centaines ou plusieurs milliers. Le réseau doit donc être capable de fonctionner efficacement avec une grande quantité de capteurs. De plus, les nœuds doivent traiter un grand nombre d'événements sans être saturés.
- **Topologie dynamique** : la mobilité des stations de base et/ou des capteurs est parfois nécessaire dans de nombreuses applications. La topologie du réseau est ainsi fréquemment changeante et en constante évolution. De plus, l'état d'activité des capteurs (*extinction, mise en veille ou actif*) intervient dans les changements de la topologie. La conception d'un protocole d'auto-organisation qui s'adapte continuellement et rapidement aux changements s'avère nécessaire pour assurer le bon fonctionnement du réseau.

- **Coût de production** : l'intérêt de créer une nouvelle technologie est de faciliter la vie quotidienne des utilisateurs et de permettre de gagner du temps et de l'argent. Les réseaux de capteurs sont composés d'un grand nombre de nœuds capteurs. Par conséquent, le prix d'un capteur doit être réduit afin de concevoir un réseau de capteurs abordable.
- **L'environnement** : généralement les nœuds capteurs sont déployés dans des zones géographiques lointaines pour mesurer et contrôler un phénomène. Le champ de captage peut être un océan, un champ contaminé par des produits chimiques ou biologiques ou encore un champ de bataille. Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans ces régions relativement éloignées et hostile.
- **Les contraintes matérielles** : un nœud capteur est constitué d'un ensemble de composants nécessitant d'être regroupés dans un module convenable qui peut être de la taille d'une boîte d'allumettes [17]. Certaines techniques de routage et tâches de perception nécessitent des informations sur la localisation avec une grande exactitude. Par conséquent un capteur doit être doté d'un système de localisation. Un mobilisateur peut être nécessaire pour faire déplacer des nœuds afin d'effectuer certaines tâches. Toutes ces sous-unités occupent de la place dans un dispositif dont la taille peut être inférieure à 1 cm³.
- **Les médias de transmission** : dans un réseau de capteurs sans fils, les nœuds sont interconnectés à travers une interface de communication sans fil : une liaison radio, infrarouge ou optique. Pour réaliser les différentes opérations d'un réseau, le media de transmission choisit doit être fiable. La plupart des réseaux de capteurs utilisent les radios fréquences pour communiquer [11]. Ces dernières sont omnidirectionnelles. Il existe des bandes de fréquences internationales à partir desquelles, les réseaux de capteurs allouent leurs bandes (*bandes ISM*).
- **La consommation d'énergie** : l'économie d'énergie est l'une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge de sources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum leur énergie afin de pouvoir fonctionner. Les réseaux de capteurs fonctionnent selon un mode de routage par saut. Chaque nœud du réseau joue un rôle important dans la transmission de données. Le mauvais fonctionnement d'un nœud implique un changement dans la topologie du réseau et impose une réorganisation [20]. L'énergie totale consommée par un nœud capteur a pour origine trois fonctions

principales qui sont [13] :

- **Capture** : les sources de consommation d'énergie dans les composants de captage peuvent être : l'échantillonnage des signaux, la conversion des signaux électriques, le traitement des signaux et la conversion analogique numérique. L'énergie consommée pendant la phase de capture varie selon la nature de l'application. En effet, une capture à intervalles réguliers consomme moins d'énergie qu'une surveillance continue.
- **Communication** : cette communication est assurée dans la plus part des RCSFs par le support de transmission radio. La consommation d'énergie de ce dernier est affectée par plusieurs facteurs : le type du système de modulation, la quantité des données à communiquer, la puissance de transmission. Les radios consomment beaucoup plus d'énergie dans les modes de transmission et de réception. En effectuant cette tâche de communication, le capteur peut fonctionner selon quatre modes : émission, réception, écoute ou mise en veille. C'est cette tâche qui consomme le plus d'énergie surtout en transmission de données. Par conséquent, la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs est en fonction d'émissions : plus le nombre de nœuds réémettant le message est faible plus la technique de diffusion est efficace.
- **Traitement** : cette tâche inclus le contrôle des composants de capture, et l'exécution des protocoles de communication et des algorithmes de traitement des signaux sur les données collectées. Elle est effectuée par les microprocesseurs. Cette phase consomme beaucoup moins d'énergie comparée à la phase de communication . Dans [29] les auteurs montrent que la quantité d'énergie requise pour la transmission de 1kb de données sur une portée de 100 mètres est approximativement égale à la quantité nécessaire pour exécuter 3 millions d'instructions avec une vitesse de 100 MIPS (*Million of Instructions Per Second*).

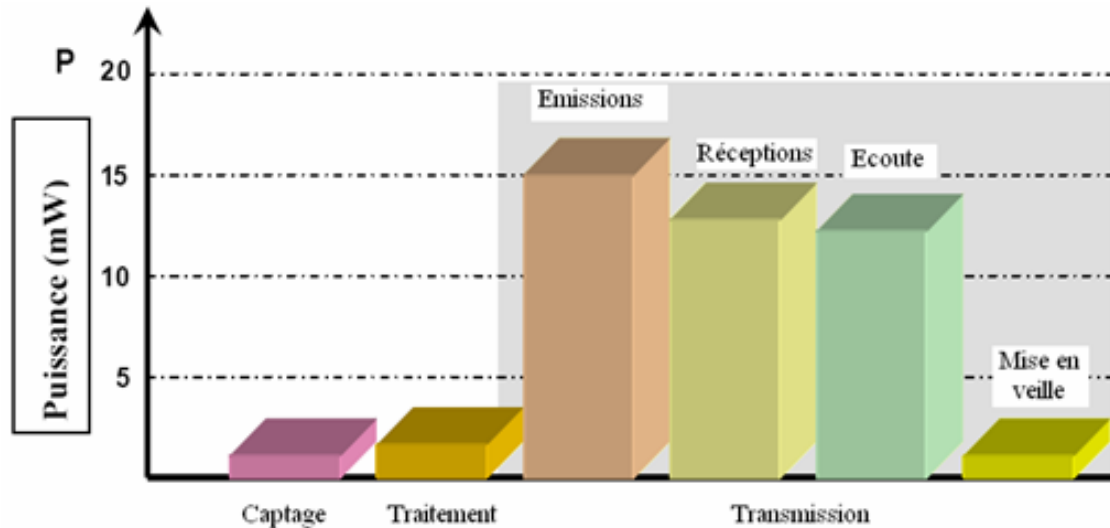


FIGURE 1.5 – Consommation d'énergie en captage, traitement et transmission [32].

1.3 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil, représentent 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 ces applications : santé, environnement, ...etc. Cela grâce à la flexibilité, la tolérance aux pannes, la fidélité élevée des capteurs, le cout réduit et les caractéristiques de déploiement rapide des réseaux de capteurs.

Nombreux sont les problèmes rencontrés lors des recherches effectuées dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, notamment le problème de routage et de la diffusion.

En effet les protocoles conçus pour ce genre de réseaux doivent tenir compte de leurs spécificités et être performant en termes des choix des routes optimales pour acheminer l'information d'un capteur à la station de base et vice versa. Il doivent minimiser le nombre des réémissions et des réceptions redondantes et assurer une couverture maximale des capteurs composant le réseau et cela en minimisant la consommation d'énergie. Ainsi, le réseau peut passer à l'échelle sans que ses performances se dégradent.

Etude critique des protocoles de diffusion dans les réseaux de capteurs sans fil

2.1 Introduction

La communication entre les nœuds capteurs fait l'objet de constantes recherches destinées à améliorer son rendement. Etant donnée la forte contrainte énergétique, la durée de vie du réseau devient une notion critique. En effet, le remplacement fréquent des batteries est à exclure dans un terrain qui peut être à accès difficile et hostile.

Dans les réseaux de capteurs, la diffusion permet le partage efficace des données entre les nœuds. Due à l'énergie limitée des nœuds, elle est devenue l'un des problèmes cruciaux touchant à cette contrainte.

Dans ce chapitre, nous allons aborder la notion de diffusion, traiter multiples protocoles existants selon les axes de classification des techniques de diffusion et terminer par une étude comparative de ces techniques selon plusieurs critères.

2.2 Notion de diffusion

La diffusion (*broadcast en anglais*), est une façon de router les informations d'une source vers tout l'ensemble du réseau, où un hôte source désire transmettre un message vers l'ensemble du réseau. Aucun routage n'est nécessaire pour effectuer une diffusion, puisqu'aucune route n'est requise. Les applications de cette opération sont nombreuses, telles que la découverte de route, la découverte de services, le lancement d'alertes au sein d'un réseau, la synchronisation ou encore la dissémination d'information ou d'ordre pour

un réseau de capteurs. L'efficacité de cette opération est, donc, primordiale pour le bon fonctionnement du réseau.

La manière la plus simple pour effectuer une diffusion est connue sous le nom de diffusion aveugle (*blind flooding en anglais*). Son principe est le suivant : chaque hôte recevant pour la première fois le message à diffuser réémet celui-ci à destination de ses voisins. Si le réseau est connexe (*il existe un chemin entre la source et n'importe quel autre hôte*), et que l'on suppose l'absence de collisions, alors ce processus aboutit à une couverture complète du réseau. Malheureusement, cet algorithme très simple n'est pas efficace car il requiert la participation de tous les hôtes, alors que cela n'est pas toujours nécessaire. En conséquence, il conduit à une grande quantité de messages redondants et d'énergie gaspillée.

Les portées de communication des objets sans fil étant limitée, on considère généralement qu'il est impossible pour l'hôte source de pouvoir contacter directement l'ensemble du réseau. Il est nécessaire d'utiliser un mécanisme multi-sauts, et donc de faire participer de nombreux hôtes au processus [16].

Plusieurs méthodes plus efficaces ont été proposées, beaucoup sont centralisées. C'est-à-dire qu'elles requièrent une connaissance globale du réseau pour fonctionner : l'existence de chaque nœud, les communications possibles entre eux et potentiellement leur position. Rassembler ces informations dans un réseau dense tel que celui des réseaux de capteurs, est pratiquement irréalisable : le coût de cette opération et la consommation d'énergie seront énormes. Des solutions dites localisées qui ne nécessitent que des connaissances sur le voisinage immédiat de chaque hôte ont, donc, été explorées.

2.3 Les cas d'utilisation de la diffusion

La diffusion est utilisée dans un réseau pour divers opérations. En effet, la diffusion peut être utilisée pour initialiser et configurer le réseau, découverte de la topologie et des chemins entre une paire de nœuds. Son efficacité est alors d'une grande importance.

2.3.1 Diffusion lors de clusterisation

Le fait de partitionner le réseau en un certains nombres de clusters est appelé clustering. Dans cette méthode, les clusters sont formés en utilisant des techniques efficaces en énergie et une métrique spécifique ou une combinaison de métriques. Ils sont identifiés par un nœud appelé Cluster-Head (*CH*). C'est ce nœud qui est responsable de la coordination entre les nœuds du cluster et l'acheminement de leurs données vers la station de base. Le CH est sélectionné selon des critères bien spécifiques.

Lors de la construction des clusters la diffusion est utilisée pour avoir une information sur le voisinage, et pour faire propager l'information sur le CH élu. En effet, la connaissance du voisinage se fait par la diffusion des messages HELLO, le nœud choisit comme CH diffuse son statut dans son voisinage et invite ses voisins qui ne sont pas encore affiliés à d'autres clusters de le rejoindre.

De nombreux protocoles et algorithmes ont été proposés dans la littérature pour pouvoir élire les CHs et former les clusters tout en minimisant la consommation d'énergie.

◦ **Exemple**

• **Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) :**

Heinzelman et al. dans [36], ont proposé un algorithme de clustering appelé LEACH, pour le routage dans les réseaux de capteurs sans fil homogènes. LEACH est un algorithme distribué qui choisit aléatoirement les nœuds CHs selon l'ordonnement Round-Robin.

LEACH est divisé en deux étapes : phase d'installation (*set-up*) et la phase d'état stationnaire (*steady-state*). La première est l'étape où les CH sont sélectionnés et les clusters sont formés. Un nœud qui décide d'être CH génère une valeur aléatoire comprise entre 0 et 1 et la compare à une valeur seuil $T(n)$. Si cette valeur est inférieure à $T(n)$, ce nœud devient CH pour le round courant, sinon, il ne le sera pas. Les CHs annoncent leurs décisions aux nœuds voisins pour que ces derniers puissent les rejoindre, et former ainsi des clusters. La seconde étape consiste en l'acheminement des données de chaque nœud vers son CH et de ce dernier vers la station de base. Dans le but de minimiser la quantité de données envoyée à la station de base, les CHs fusionnent les données capturées par leurs nœuds membres et les envoient en un seul paquet.

◦ **Discussion**

LEACH apporte un gain d'énergie significatif par rapport au protocole de routage avec minimisation d'énergie (*MTE*) et avec communication directe. Cependant, le choix des CHs se fait d'une manière aléatoire et aucune contrainte n'est posée sur leur distribution ou leurs niveaux d'énergie. Ainsi les CHs peuvent se localiser dans le même endroit par conséquent un nœud isolé ne pourra pas rejoindre un CH.

2.3.2 Diffusion lors du routage

Le routage est un mécanisme très important dans n'importe quel réseau. En effet, sans routage il ne peut y avoir de communication dans un réseau. Il est encore plus important

dans les réseaux de capteur sans fil, puisque son efficacité est reliée à la conservation de l'énergie. Lors de ce mécanisme, le processus de diffusion est appliqué comme suit :

Pendant la phase d'installation, la diffusion est effectuée pour trouver des chemins et créer des tables de routage. Lors de cette étape, les plus courts chemins sont calculés et le coût énergétique total pour chaque nœud est estimé dans le but de trouver le chemin qui requiert le moins d'énergie. La diffusion est aussi utilisée pour le maintien des routes et de la topologie dans le réseau. Des messages de diffusion sont envoyés périodiquement pour renforcer les chemins et les maintenir.

2.3.3 Diffusion lors de découverte de voisinage

Il est supposé que chaque nœud connaît l'ensemble de ses voisins à k sauts. Pour un protocole centralisé, ce k possède une valeur maximum (*égale à la largeur ou diamètre du réseau*), alors que pour un protocole localisé il est généralement au plus égale à un ou deux.

Dans les réseaux de capteurs sans fil, la connaissance de voisins est le plus généralement acquise par l'utilisation de petits messages de contrôle, contenant au minimum l'identité de l'émetteur, appelés message HELLO. Ces derniers sont régulièrement émis par chaque nœud afin de signaler leur présence à leur voisins : lorsqu'un nœud v reçoit un message HELLO en provenance d'un nœud u , v peut en déduire qu'il possède u dans son voisinage à un saut. La liste des voisins est stockée dans une table, dont les entrées trop anciennes sont régulièrement effacées. Cela arrive lorsqu'un voisin n'a pas signalé sa présence depuis un temps trop important, chose qui survient par exemple si ce voisin s'est déplacé ou s'est éteint.

La connaissance du voisinage à deux sauts peut être obtenue à la suite de deux rondes de messages HELLO. En effet, une fois la connaissance à un saut acquise, la table de voisinage peut elle-même être incluse dans les messages HELLO [16].

2.4 Techniques de diffusion existantes

Plusieurs méthodes de diffusion ont été proposées dans la littérature. Dans ce qui suit des techniques de diffusion conçues pour les réseaux de capteurs sans fil seront détaillées, dans le but de tirer profit de leurs avantages et éviter leurs inconvénients.

2.4.1 La diffusion aveugle

La diffusion aveugle est l'une des première technique de diffusion proposée pour les réseaux filaire et les réseaux sans fil. Cette méthode consiste en ce que chaque nœud qui

reçoit un message, le retransmette à l'ensemble de ses voisins. Bien que cette méthode de diffusion soit simple, elle consomme la majeure partie des ressources du réseau et génère un nombre important de messages redondants. Ce qui engendre une saturation du réseau et de nombreuses collisions provoquant des pertes de paquets et d'énergie.

2.4.2 Diffusion avec connaissance de voisinage et sans ajustement de portée

Plusieurs approches figurent dans ce contexte :

2.4.2.1 Diffusion basée sur les relais multipoints (*MPR*)

Le protocole de diffusion par relais multipoints appartient à la famille des méthodes par désignation de voisins. Son objectif est de minimiser le nombre de nœuds qui réémettent le message de diffusion. Il a été proposé par Qayyum et al. dans [30]. Son principe est de déterminer un sous-ensemble de nœuds relais des voisins à un saut pour chaque nœud u qui vont relayer le message de diffusion pendant le processus d'inondation, de telle manière qu'ils joignent tous les voisins à deux sauts de u . Les identités des nœuds ainsi sélectionnés sont incluses dans le message de diffusion. Ce processus se répète d'émetteur en émetteur jusqu'à ce que la diffusion ait été accomplie. Si un nœud reçoit plusieurs fois le même message à diffuser, seule la première réception est prise en compte et les autres réceptions seront simplement ignorées.

L'efficacité de ce protocole dépend de l'algorithme utilisé pour sélectionner les relais multipoints pour chaque nœud : plus la cardinalité de sous-ensemble choisi est petit, plus la diffusion sera efficace. La détermination d'un sous-ensemble optimale est considérée comme un problème NP-complet, d'où l'utilisation d'une approche heuristique pour pouvoir le déterminer.

Il est considéré que les sous-ensembles des nœuds à un saut et à deux sauts d'un nœud u du réseau sont disponibles.

Soit un nœud u , $N_1(u)$ l'ensemble de ses voisins à un saut, et $N_2(u)$ l'ensemble de ses voisins se trouvant à deux sauts. La détermination de l'ensemble des nœuds relais du nœud u , noté $MPR(u)$ par la méthode heuristique proposée par Qayyum et al. se fait de la manière suivante :

1. Initialiser $MPR(u)$ à vide
 - $MPR(u) = \emptyset$
2. Ajouter à $MPR(u)$ tous les voisins imposés Un voisin est dit imposé, s'il est le seul à pouvoir communiquer avec au moins un voisin à deux sauts isolé. Retirer de $N_2(u)$

tous les nœuds accessibles à partir des nœuds imposés.

3. Tant qu'ils existent des nœuds dans $N_2(u)$ qui ne sont pas couverts faire :
 - Calculer pour chaque nœud qui n'est pas dans $MPR(u)$ le nombre de nœuds de $N_2(u)$ qu'il peut couvrir.
 - Ajouter à $MPR(u)$ le nœud ayant le plus grand nombre.

Pour illustrer le protocole MPR, nous l'exécutons sur l'exemple présenté par la figure 2.1. Nous obtenons $\{g, f\}$ comme ensemble de nœuds relais pour le nœud d.

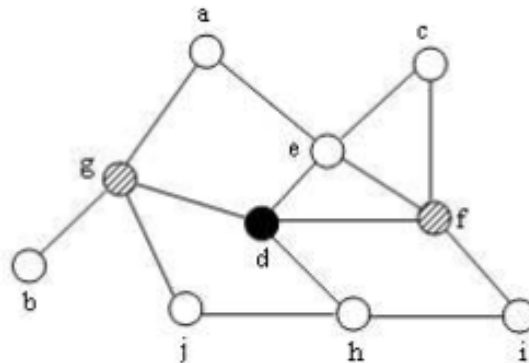


FIGURE 2.1 – L'ensemble $\{f, g\}$ nœuds relais du nœud d.

Cette technique de diffusion diminue de manière remarquable le nombre de messages retransmis par rapport au mécanisme classique d'inondation aveugle. Cependant, elle souffre de quelques problèmes vu qu'elle a été conçue dans un environnement idéal, ce qui signifie qu'un message est toujours correctement envoyé à partir d'un nœud A à un nœud B. Ce qui n'est pas toujours le cas si on l'applique dans un environnement réaliste, où l'atténuation du signal pourrait avoir une influence sur la bonne réception d'un message.

o Exemple

LEHSAINI et al. dans [24], ont proposé deux heuristiques en se basant sur les hypothèses suivantes :

- Chaque nœud a une antenne omnidirectionnelle ;
- Les nœuds sont presque immobiles dans une période de temps raisonnable ;
- Un nœud est considéré comme le voisin d'un autre nœud si la probabilité pour qu'il reçoit le message " HELLO " est supérieur à un certain seuil P_0 ;
- Un paquet peut être reçu sans erreurs si la distance D entre l'émetteur et le récepteur est inférieur ou égale à R, dans lequel la probabilité d'une réception réussite à D est égale à P_0 .

Le but principal de leur travail se porte sur la détermination de la probabilité d'une

réception réussie entre les nœuds, dans l'ordre pour pouvoir savoir si le message est bien reçu ou endommagé. En outre, le calcul de cette probabilité est influencé par la distance, la puissance du signal et la présence d'obstacles. Pour évaluer la probabilité calculée, le modèle Log-Normal Shadowing Model (*LNSM*) est utilisé. LNSM, permet d'avoir un graphe pondéré où le poids de chaque arête $(u, v) \in E$ (*ensemble des arrêtes*) est égal à la probabilité de réception sans erreurs entre u et v est $P(u, v)$. Leur solution est une amélioration des heuristiques proposées par Ingelrest (2006), qui se basent sur le protocole de diffusion par MPR dans un environnement réaliste.

D'après LEHSAINI et al. , la proposition d'Ingelrest ne porte pas d'importance au problème de trouver la probabilité maximale de succès de réception entre un nœud et ses voisins à un saut, comme il est difficile de garantir la couverture de tous les nœuds à deux sauts. Cependant, LEHSAINI a vu la nécessité d'utilisation d'un seuil pour avoir une sélection optimale de voisins directs du nœud source qui vont agir en tant que relais dans le but d'atteindre le plus grand nombre de voisins à deux sauts que possible, tout en considérant le pourcentage de la couverture comme critère d'arrêt.

Ainsi, les auteurs ont proposé dans [24] deux schémas (*schéma de base et schéma robuste*), pour implémenter leurs solutions en se basant sur le protocole MPR avec le modèle LNSM. Cela pour pouvoir comparer les performances des protocoles MPR en termes d'accessibilité et le pourcentage des nœuds qui retransmettent le message dans le réseau.

Il est considéré que chaque nœud u a la connaissance de ses voisins à deux sauts et sélectionne un ensemble de nœuds parmi ses voisins à un saut qui deviennent des nœuds MPR.

Un nœud MPR est choisi de telle sorte que, si un nœud u émet, seul son MPR réémet le message et tous les nœuds appartenant à l'ensemble des voisins de u à deux sauts le reçoivent. Pour sélectionner les nœuds qui doivent agir comme des relais, il supprime d'abord les nœuds isolés de l'ensemble $MPR_1(u)$ et favorise la sélection des voisins à un saut qui peuvent recevoir correctement le message du nœud source comme nœud relais.

Dans le schéma de base proposé, le but principal est la sélection du meilleur voisin en tant que relais pour diffuser le message. Si la probabilité d'une réception réussie, des voisins à un saut, est supérieure à une valeur seuil P_0 , le nœud source u calcule le poids de chacun de ses voisins à un saut. Finalement, u sélectionne le nœud dont le poids calculé est maximal comme nœud relais.

Dans le schéma robuste, au lieu d'utiliser un seul seuil pour sélectionner les meilleurs voisins comme nœuds relais, ils ont proposé d'ajouter une autre valeur seuil P_1 pour garantir que les voisins sélectionnés peuvent relayer le message, aux voisins à deux sauts du nœud émetteur, avec une grande probabilité de réception sans erreurs. Le nœud calcule

le poids de la connectivité entre ses voisins à un saut et ceux à deux sauts, il vérifie s'il est supérieur à P_1 . Si cette condition est vérifiée, il applique le procédé du schéma de base. Sinon, si c'est une égalité, il choisit le nœud dont la probabilité de réception sans erreurs est plus grande.

Les auteurs, dans leurs simulations, ont démontré l'efficacité des améliorations apportées en termes d'accessibilité et de couverture. Lors de la sélection du nœud relais, ils n'ont pris en considération que la probabilité de réception correcte des messages envoyés pour permettre à chaque nœud de les recevoir au moins une fois. Cependant, le critère de l'économie d'énergie reste d'une importance capitale, ce qui n'est pas pris en considération vu que le nombre important de messages circulant dans le réseau n'est pas optimisé.

2.4.2.2 Diffusion basée sur les ensembles dominants connexes (*CDS*)

La technique de diffusion basée sur les ensembles dominants, peut être utilisée comme un backbone pour les communications dans les réseaux ad hoc et de capteurs sans fil, puisque les nœuds de l'ensemble dominant peuvent couvrir l'ensemble des nœuds du réseau.

Cependant, le processus de propagation d'un message de diffusion d'un nœud dominant à un autre reste un vrai handicap pour cette technique. Pour cela, il est nécessaire d'établir une certaine connexité entre les nœuds de l'ensemble dominant et par suite obtenir un ensemble dominant connexe. Cette technique de diffusion est une solution possible pour les réseaux dans lesquels les nœuds restent toujours actifs. Cependant, garder l'équipement radio toujours actif pénalise grandement les nœuds de l'ensemble dominant et épuisent rapidement leurs batteries.

Pour remédier à cette limitation, il est nécessaire de choisir les nœuds ayant plus de capacités dans leur voisinage pour supporter efficacement la diffusion comme nœuds dominants, d'autre part ces nœuds choisis doivent jouer ce rôle pour une durée limitée.

o Exemples

- **Algorithme BOPP**

Un protocole de diffusion appelé BrOadcast Powrer Preserving protocol (*BOPP*) a été proposé par Ni et al. en [26]. Dans ce protocole, le taux de fiabilité de réception de paquets est calculé pour chaque nœud du réseau. En fonction de ce taux, le protocole BOPP sélectionne l'ensemble des nœuds qui vont participer à l'opération de diffusion. Ce protocole tente d'équilibrer entre les deux propriétés suivantes : atteindre le plus grand nombre de nœuds par le message de diffusion et limiter le nombre de nœuds participants à la transmission de ce message pour minimiser l'énergie consommée et donc garantir une plus longue durée de vie pour le réseau.

Le réseau est représenté par un graphe $G=(V,E)$, pour chaque nœud u du graphe est calculé le taux de fiabilité $s(u)$. La somme de ces taux représente le taux de fiabilité de tous les nœuds du réseau $\text{sum}(N,U)$ où $U = N \setminus R$ tel que R est l'ensemble de nœuds qui vont relayer le message de diffusion. La fiabilité de tout le réseau est notée $SM(N,U)$. C'est le résultat de la division de $\text{sum}(N,U)$ par $\text{sum}(N,\{\})$ i.e. tous les nœuds du réseau sont considérés comme relais.

Un algorithme glouton est utilisé pour choisir les nœuds de l'ensemble U , à chaque étape l'algorithme choisit le nœud causant la plus faible baisse de SM et l'ajoute à U , ce processus est répété tant que les nœuds du réseau restent connectés. Généralement une borne inférieure est fixée pour SM .

L'algorithme est défini comme suit :

1. Tant que G est connecté et SM est au-dessus d'un certain seuil faire :

Enlever le nœud qui engendre la plus faible réduction de U .

Pour prolonger la durée de vie du réseau, un nœud ayant son énergie restante inférieure à un certain seuil alerte la station de base. Ce nœud est retiré de l'ensemble des nœuds relais et cet ensemble est reconstitué.

o **Discussion**

Comparé au protocole MPR classique, les résultats de simulation montrent que le BOPP est nettement meilleur en termes de nombre de messages retransmis, de nœuds participant à la diffusion, du taux de diffusion et surtout de l'énergie consommée. Cependant, les auteurs de ce protocole n'ont pas pris en considération le risque de la segmentation du réseau. En effet, si l'un des nœuds appartenant au CDS tombe en panne ou s'éteint brusquement, le réseau risque d'être partagé en sous-réseaux. De ce fait, le réseau ne sera plus connexe, la communication entre les nœuds ne peut pas se faire normalement et des messages seront perdus.

• **Algorithme Connected Dominating Set-Energy protocol (CDSEP)**

Une amélioration a été apportée au protocole des ensembles dominants connexes CDS par Kies et al. dans [22] qui est CDSEP. Kies et al. ont conçu cet algorithme dans le but de minimiser l'inondation par les messages de diffusion dans le réseau par la réduction des transmissions redondantes. CDSEP est un nouvel algorithme distribué qui calcule le CDS en se basant sur l'énergie des nœuds et leur connectivité. Dans ce protocole, le CDS est proposé comme un backbone virtuel, le CDS est un bon candidat pour être un backbone virtuel puisque tous les nœuds qui ne font pas partie du CDS sont à un saut de ce dernier. Les fonctions visées par cette topologie virtuelle sont les suivantes :

- Tirer parti de l'hétérogénéité impliquant plus activement les nœuds forts en termes d'énergie.
- Optimiser l'inondation, afin d'éviter la formation d'une tempête de diffusion.

L'algorithme CDSEP proposé est exécuté en deux étapes :

La première consiste en la création des nœuds dominants (*DNs*), i.e, les nœuds CDS par l'intermédiaire des messages HELLO. Chaque nœud dans le réseau sélectionne un nœud de son voisinage à un saut qui peut retransmettre ses paquets, ce nœud est appelé nœud dominant. L'ensemble des nœuds dominants formes la topologie virtuelle appelée le Connected Dominating Set-Energy (*CDSE*) dans le réseau. L'ensemble *DNs* est choisit selon un paramètre de sélection "Selection Parameter" (*SP*), c'est un paramètre qui entre dans la prise de décision pour construire la topologie virtuelle basée sur le CDS et l'énergie. Ce paramètre est calculé à partir de deux autres paramètres, le premier lié au nœud qui est son énergie résiduelle, le second lié au réseau qui est la connectivité, i.e. le degré du nœud dans le réseau. Le *SP* est obtenu par l'équation suivante :

$$SP_i(t) = E_i(t) * \log(C_i(t))/1000 \quad (2.1)$$

Où

$SP_i(t)$: paramètre de sélection d'un nœud i à un instant t ,

$E_i(t)$: énergie d'un nœud i à un instant t en Joule,

$C_i(t)$: degré d'un nœud i à un instant t .

Après avoir sélectionné son nœud dominant, chaque nœud diffuse un message HELLO contenant des informations sur ses voisins, de leur état de lien ainsi que sa valeur *SP*. Chaque nœud maintien une table de voisinage dans laquelle sont enregistrées des informations relatives à ses voisins, l'état de la liaison avec ces voisins, son *SP*, une liste de ses voisins à deux sauts et le temps de maintien qui est la durée de vie de la table voisine. À partir des renseignements obtenus à partir des messages HELLO, chaque nœud construit sa table *CDSE* dans laquelle il enregistre l'adresse de ses voisins à un saut et ce dernier est choisit comme un *DN*.

La seconde étape est l'interconnexion des nœuds dominants (*DNs*), en utilisant des messages d'interconnexion Interconnection Messages (*IM*). Dans le but d'interconnecter les nœuds *CDSE*, des messages *IM* sont diffusés par chaque *DN* vers tous les nœuds du réseau. Un nœud envoie un message *IM* pour déclarer sa table *CDSE*. L'information diffusée par ce message aidera chaque nœud à construire sa table de topologie, cette dernière donnera une vue globale sur la topologie virtuelle

du CDSE. Pour réduire les problèmes de diffusion, un nœud ne peut transmettre ou retransmettre le message IM que s'il appartient aux nœuds CDSE. Quand il y a un changement dans la table, un message IM doit être diffusé.

○ **Discussion**

L'efficacité de l'algorithme CDSEP est prouvée par les résultats de simulation, en les comparant à ceux obtenus par l'application de l'algorithme MPR classique. En effet, l'application de l'algorithme CDSEP dans un réseau de capteurs sans fil réduit considérablement le taux d'énergie consommée, de paquets échangés et le nombre de nœuds appartenant au CDS. Cependant, étant donné la mémoire limitée des capteurs, la sauvegarde des tables de voisinage et de routage par ces derniers peut être pénalisante, d'autant plus qu'un réseau de capteur est très dense et que sa topologie est changeante avec la mobilité des nœuds. En effet de nouvelles tables doivent être très reconstruites et enregistrées à chaque changement de la topologie. Ce qui provoque une perte d'énergie.

2.4.2.3 Diffusion avec MPR basée sur les ensembles dominants connexes

Moulaoui et al. dans [26] ont proposé une amélioration de la méthode MPR, dans laquelle le processus de diffusion est basé sur le CDS, qui contient les nœuds ayant le poids maximum dans le réseau. Ce poids est calculé pour chaque nœud en fonction de son degré et de son énergie résiduelle. Contrairement à la méthode classique DS-MPR qui est implémentable dans le modèle de disque unitaire, qui n'est pas réaliste puisqu'il suppose que les messages sont toujours bien reçus, la méthode RDS-MPR proposée dans [26] peut être applicable dans un modèle réaliste comme celui du masquage lognormal qui prend en considération les contraintes du réseau i.e. l'atténuation du signal, la présence d'obstacles et l'occurrence de collisions. Les modifications effectuées dans [26] se portent sur la fonction de calcul du poids des nœuds du réseau.

○ **Exemple**

Comme exemple de ce type de protocole, l'heuristique suivante :

● **L'heuristique Realistic Dominating Set-MultiPoint Relais (RDS-MPR)**

Dans [26] une nouvelle fonction de calcul de poids appelée RW (*Realistic Weight en anglais (2.2)*) qui prend en compte la probabilité de réception selon le modèle lognormal. Elle est définie comme suit :

$$RW(\mathbf{u}) = \alpha \times RW_{\text{degré}}(\mathbf{u}) + \beta \times RW_{\text{énergie}}(\mathbf{u}) + \gamma \times RW_{\text{probabilité}}(\mathbf{u}) \quad (2.2)$$

Avec $\alpha + \beta + \gamma = 1$

1. Le poids réaliste du degré d'un nœud v $RW_{\text{degré}}(v)$ est le nombre de nœuds qui sont couverts par v et qui ne sont pas encore couverts par d'autres nœuds dans $S(u)$ divisé par le poids degré maximal de nœuds dans $N_1(u) \cup S(u)$.
2. Le poids réaliste d'énergie d'un nœud v $RW_{\text{énergie}}(v)$ est l'énergie résiduelle de v divisée par le poids d'énergie maximum des nœuds se trouvant dans l'ensemble $N_1(u) \cup S(u)$.
3. Le poids réaliste de la probabilité d'un nœud v $RW_{\text{probabilité}}(v)$ est le poids de la probabilité local $q(v)$ divisée par le maximum des poids des probabilités locales des nœuds $N_1(u) \cup S(u)$.

P_t : une probabilité temporaire dans l'heuristique avec laquelle on peut avoir une bonne réception.

p_0 : probabilité minimale d'une bonne réception, avec moins que p_0 on considère que les données reçues sont erronées ou que la réception n'a pas eu lieu.

Après avoir définie tous les poids de la nouvelle fonction calculant le poids, l'heuristique est donnée comme suit :

Soient $s(u)$ et $s_1(u)$ le sous-ensemble de $N_1(u)$ choisit comme relais et le sous-ensemble de $N_2(u)$ pas encore couverts par les nœuds de $s(u)$, $p(u,v)$ la probabilité qu'il ait une bonne réception entre les nœuds u et v .

1. Commencer avec un ensemble vide $S(u)$ et $S_1(u) = N_2(u)$;
2. Sélectionner les nœuds de $S_1(u)$ qui n'ont qu'un parent dans $N_1(u)$, les retirer de $S_1(u)$ et ajouter leurs parents à $S(u)$;
3. Tant qu'il existe des nœuds dans $S_1(u)$ faire :
 - Calculer le poids de tous les nœuds $N_1(u) \cap S(u)$;
 - Ajouter le nœud v à $S(u)$ pour lequel ce poids est maximal et $p(u,v) > p_t$. S'il y a plus d'un nœud avec le même poids maximum choisir celui qui a le maximum d'énergie restante. Ensuite, retirer $N_1(v)$ de $S_1(u)$;
 - Calculer l'accessibilité Re ;
 - Si $Re < 90\%$ et $P_t > P_0$, réduire légèrement P_t et augmenter légèrement γ .
 Sinon arrêter.

Une autre méthode de diffusion qui est RDS-MPR étendu (*eRDS-MPR*) est définie dans [39], il s'agit d'une extension de RDS-MPR. Dans cette variante des changements ont été apportés sur la fonction calculant le poids d'un nœud en essayant de le rendre plus étendu i.e. changer le poids du degré du nœud, de son énergie et de sa probabilité en tenant compte de $N_2(u)$ et $N_3(u)$, ce dernier qui est le sous-ensemble à trois sauts du nœud u . La fonction du poids étendu est définie comme suit :

$$RW(\mathbf{u}) = \alpha \times RW_{\text{degré}}(\mathbf{u}) + \beta \times RW_{\text{énergie}}(\mathbf{u}) + \gamma \times RW_{\text{probabilité}}(\mathbf{u}) \quad (2.3)$$

Avec $\alpha + \beta + \gamma = 1$

1. Le poids étendu du degré d'un nœud v $EW_{\text{degré}}(v)$ est le poids du degré de ce nœud divisé par le maximum du même poids des nœuds $N_1(\mathbf{u}) \cup S(\mathbf{u})$.
2. Le poids étendu de l'énergie d'un nœud v $EW_{\text{énergie}}(v)$ est le poids de l'énergie de ce nœud divisé par le maximum du même poids des nœuds $N_1(\mathbf{u}) \cup S(\mathbf{u})$.
3. Le poids étendu de la probabilité d'un nœud v $EW_{\text{probabilité}}(v)$ est le poids de la probabilité de ce nœud divisé par le maximum du même poids des nœuds $N_1(\mathbf{u}) \cup S(\mathbf{u})$.

L'algorithme appliqué dans cette méthode est le même que celui définie précédemment. Les modifications apportées à cette méthode sont au niveau de la fonction qui calcul le poids d'un nœud pas au niveau de l'algorithme.

o Discussion

Les deux approches proposées par Moulahi et al. augmentent considérablement le taux d'accessibilité dans le réseau. En effet, il peut atteindre 94% pour RDS-MPR et peut dépasser 97% pour eRDS-MPR. Cependant, cette accessibilité croissante requiert une consommation d'énergie, un temps de communication et une taille mémoire plus importants. Cela est plus remarquable dans la deuxième méthode, où les valeurs obtenues par simulation sont presque le double de celles de la méthode originale DS-MPR, ce qui peut être pénalisant pour le réseau. Enfin, bien qu'eRDS-MPR améliore RDS-MPR en accessibilité, cette dernière est meilleure en termes d'optimisation de l'utilisation des ressources d'un nœud du réseau.

2.4.2.4 Diffusion basée sur le mécanisme d'élimination de voisins (*NES*)

Dans le but d'éliminer les messages redondants au cours d'un processus de diffusion, le mécanisme d'élimination de voisins, Neighbor Elimination Scheme (*NES*) a été proposé. Ce mécanisme se base sur la politique "Wait and See", où un nœud u ne relaye pas immédiatement un message reçu, il attend un laps de temps (*timeout*) pendant lequel il écoute les communications de ses 1-voisins. Le temps d'attente pourrait être choisi d'une manière aléatoire, ou en fonction de la topologie du réseau. A l'expiration du *timeout*, s'il existe encore des 1-voisins du nœud u qui n'ont toujours pas reçu le message, u le réémettra, sinon la réémission sera annulée. Toutefois, il est possible que certains 1-voisins de u aient reçu le message par l'intermédiaire de ses 2-voisins sans que le nœud

u ne le sache. Dans ce cas, le nœud u réémettra le message malgré que cette réémission soit inutile.

2.4.3 Diffusion basée sur le Duty Cycle

Les réseaux de capteurs sans fil ont une importante propriété cyclique, ce qui veut dire que les capteurs alternent entre l'état actif et l'état sommeil cela aide à conserver de l'énergie et à prolonger la durée de vie du réseau. Dans un réseau dense, il y a de plus forte chance qu'un nœud soit dans l'état actif pour pouvoir écouter le trafic que dans un réseau clairsemé.

o Exemple

1. Les trames de résumé

BACHIR dans [5] a été le premier à avoir introduit l'utilisation des préambules pour réduire la consommation d'énergie.

Le principe du préambule se résume dans le fait que chaque nœud qui veut émettre une trame la précède d'un préambule suffisamment long pour que tous les nœuds récepteurs, même ceux qui sont en état sommeil, le détectent lors de leur réveil. Les nœuds étant en sommeil se réveillent après chaque intervalle de temps CI selon le taux d'activité. Chaque nœud se réveille après un Check Interval (CI) pour vérifier seulement si le canal est libre ou pas. La durée du préambule doit être supérieure à l'intervalle CI pour s'assurer qu'il soit détecté par tous les nœuds. Cette méthode réduit d'une façon remarquable le taux d'énergie consommée. Cependant, elle ne prend pas en considération le taux de collisions générées.

Dans son travail, l'auteur a traité aussi la problématique de messages redondants lors de la diffusion. Pour éviter les réceptions inutiles, il a proposé l'utilisation des trames de résumé. Dans cette technique, chaque nœud envoie une petite trame de résumé avant chaque trame de diffusion. Cette trame résume le contenu de la trame de donnée qui suivra. Le résumé peut être obtenu par l'application d'une fonction de hachage au contenu de la donnée et sera stocké dans une table interne qui contient tous les résumés des trames envoyées par chaque nœud. Quand un nœud reçoit une trame de résumé, il consulte sa table interne s'il n'a pas reçu le résumé auparavant. Si le résumé figure dans sa table alors il déduit que la trame suivante est redondante alors il éteint sa radio. Dans le cas contraire, il ajoute le résumé à sa table interne et maintient sa radio allumée pour pouvoir recevoir la trame concernée par le résumé.

Bien que cette méthode permette de réduire l'énergie gaspillée par les messages redondants, la fonction de hachage utilisée peut générer deux résumés identiques

pour deux trames de données différentes, ce qui conduira à la perte de la deuxième trame à cause de l'ignorance. En plus de la saturation de la mémoire à cause du stockage des informations dans la mémoire cache des nœuds et l'augmentation du coût de transmission.

Par la suite, l'auteur a pensé à améliorer le concept de préambule en introduisant la notion de micro trame. Le protocole résultant est appelé Micro Frame Preamble (*MFP*). Un nœud qui se réveille reçoit la micro trame au lieu du long préambule. Dans cette micro trame, un numéro de séquence qui définit à quelle heure exacte sera envoyée la trame. Chaque nœud après avoir reçu la micro trame s'endort et se réveille seulement au moment de la réception exacte de la trame de données.

Après la simulation, MFP a montré un gain important en énergie par rapport au protocole de l'échantillonnage de préambule simple. Cependant, il n'apporte pas des modifications sur le contenu du préambule mais apporte seulement des changements sur la façon dont laquelle ce dernier est transmis.

2. Dans [23], les auteurs ont utilisé un préambule de petite taille au début du message de diffusion à transmettre dans un RCSF dense. Ce préambule est écouté et sera intercepté par un sous ensemble de nœuds qui sont à l'état actif, se trouvant dans la portée du nœud émetteur ou d'un nœud relais. C'est seulement les nœuds ayant reçus le message qui vont le retransmettre. La rediffusion ne se fera qu'après un temps d'attente aléatoire pour éviter les collisions.

L'utilité d'utiliser un préambule avant le paquet à transmettre peut être justifiée par ce qui suit :

- Les nœuds capteurs sont de petits dispositifs avec plusieurs contraintes, telles que gamme radio, la mémoire, la batterie, la capacité de calcul et la communication limitée,
- Les méthodes de diffusion telle que l'inondation simple consomme une quantité d'énergie très importante,
- La redondance de messages dans les réseaux denses comme dans les réseaux clair-semés est indésirable.

o Discussion

Ce procédé réduit le nombre de messages redondants et économise de l'énergie puisqu'il y a que les nœuds qui ont reçu le message qui vont exécuter le processus de diffusion. Cependant, les auteurs n'ont pas présenté de modèle analytique pour le calcul de la taille du préambule, de techniques à suivre pour pouvoir déterminer l'ensemble des nœuds qui devront être à l'écoute ni les critères sur lesquels sont basés la sélection de ces nœuds.

2.4.4 Diffusion sans connaissance de voisinage

Le processus de diffusion peut être exécuté en utilisant des méthodes qui ne nécessitent pas forcément une connaissance au préalable du voisinage. Des exemples de ces méthodes sont présentés ci-dessous.

2.4.4.1 Méthodes probabiliste

Cette méthode ressemble à celle de la diffusion aveugle, à l'exception que les nœuds retransmettent avec une probabilité p prédéterminée au départ. Considérer que p est fixée à l'avance n'offre pas de bon résultats. En effet, si la valeur de p est trop faible diminue considérablement le taux de diffusion du message, alors qu'une valeur très élevée entraîne un nombre important de retransmission. Ce qui ramène au cas de la diffusion aveugle. Pour ne pas avoir de collisions, des temps d'attente aléatoires sont générés pour différencier les moments de retransmissions.

o Exemple

K.Jaffres-Runser et al. dans [18] ont proposé le protocole Probabilistic Gradient Broadcast Algorithm (*P-GRAB*) qui se base sur cette méthode de diffusion, dans le but de réduire le nombre de nœuds retransmetteurs et garantir une transmission robuste dans le réseau.

Le principe de leur travail se base sur le fait de calculer une probabilité de retransmission pour chaque nœud du réseau. C'est en prenant en considération la probabilité d'interférence et celle de la durée de vie d'un nœud que la probabilité de retransmission est calculée.

L'application de ce protocole permet de réduire considérablement le taux d'énergie consommée, le nombre de retransmissions et de diminuer la latence dans le réseau.

2.4.4.2 Méthode basée sur la distance

Dans cette méthode un nœud ne retransmet le message de diffusion que si la distance le séparant du nœud émetteur dépasse un certain seuil D [19]. Ce seuil peut être fixé à l'avance ou calculé. Une valeur prédéterminée du seuil causera soit un faible taux de diffusion ou au contraire un nombre important de messages redondants.

Cette technique est présentée dans [36] comme suit :

1. Quand un message de diffusion est entendu pour la première fois par un nœud u , initialiser d_{\min} (*distance minimale*) à la distance le séparant du nœud émetteur v . si $d_{\min} < D$, passez à l'étape 5.
2. Attendre un temps aléatoire Random Assessment Delay (*RAD*), ensuite, retrans-

mettre le message. Si le même message se fait entendre à nouveau, interrompre l'attente et passer à 4.

3. Le message est envoyé, la procédure se termine.
4. Mettre à jour la valeur de d_{\min} si la distance entre u et le nœud émetteur est inférieur à d_{\min} .
 - Si $d_{\min} < D$ alors aller en 5 ;
 - reprendre l'attente interrompue en 2 ;
5. Annuler la transmission si elle a été faite en 2. L'hôte ne pourra plus rediffuser le même message et le processus se termine.

o **Exemple**

Yubo et al. dans [38], ont proposé une approche de diffusion Broadcasting based on Distance Scheme (*BDS*) basée sur celle proposée dans [36]. La différence entre ces deux approches c'est que dans [38], ils ont considéré un anneau avec deux rayons de transmission : D est le rayon du cercle intérieur et la distance de transmission d'un nœud, R est le rayon du cercle extérieur. Une probabilité de retransmission est calculée en utilisant les valeurs de D et R . Cette probabilité est obtenue par la formule suivante :

$$P = (1 - (R^2/D^2)) * (1 - (\prod D^2 R^2 / 2Z))^{N-1} \quad (2.4)$$

Où Z est la surface, N est le nombre de nœuds.

La probabilité de retransmission diminue avec l'incrément du nombre de nœuds dans le réseau. Etant donné que les réseaux de capteurs sont des réseaux denses, alors l'application de cette approche pour la diffusion va être bénéfique en termes de messages retransmis, donc d'énergie consommée et garantir une plus longue durée de vie du réseau. Cependant, aucune limite n'est fixée pour comparer la probabilité, et savoir le seuil à partir duquel un nœud n'a pas à retransmettre.

2.4.4.3 Méthode basée sur la géo-localisation

Dans ce type d'approche, les nœuds n'essaient pas d'assurer la couverture de leurs voisins, mais celle de la surface déterminée par leur portée de communication.

Un nœud ne retransmet que si le gain en termes de couverture est plus important qu'un seuil donné. Cette méthode utilise une estimation précise de la zone de couverture additionnelle obtenue quand la décision de rediffuser est prise. Dans cette approche, chaque nœud doit avoir le moyen pour déterminer sa propre position. Chaque fois qu'un nœud émet un paquet il ajoute sa position dans l'en-tête du paquet. Quand un nœud reçoit

un paquet pour la première fois, il analyse l'emplacement de l'expéditeur et calcule la zone de couverture additionnelle obtenue s'il devait rediffuser. Si la zone supplémentaire est inférieure à une valeur seuil, le nœud ne va pas rediffuser, et toutes les réceptions futures du même paquet seront ignorées. Sinon, le nœud génère un temps RAD avant la réémission. Si le nœud reçoit un paquet redondant pendant le RAD, il recalcule la zone de couverture supplémentaire et la compare à la valeur du seuil. La couverture additionnelle est calculée et comparée au seuil pour toutes réceptions redondantes jusqu'à ce que le RAD expire ou que le message soit ignoré.

2.4.4.4 Diffusion basée sur un compteur

Un message de diffusion n'est pas retransmis par un nœud si le nombre de fois que ce message est reçu par ce même nœud dépasse un certain seuil.

2.4.5 Protocole hybride

La conception d'un protocole de diffusion peut être une hybridation entre deux méthodes différentes de diffusion ou plus. Dans ce contexte, nous allons aborder les exemples ci-dessous.

1. Une solution a été proposée par Hyocheol et al. dans [19], pour remédier aux problèmes de la diffusion directe. Cette solution se résume en un algorithme hybride, utilisant les méthodes probabilistes et les méthodes basées sur la connaissance de voisinage. Les nœuds du réseau sont considérés comme étant statiques.

La méthode proposée utilise la connaissance de voisinage pour le calcul de la probabilité de retransmission. Elle classe les nœuds voisins en trois classes distinctes selon leur niveau : parents (*niveau supérieur*), frères (*même niveau*) et nœuds fils (*niveau inférieur*). La probabilité de transmission dépend du nombre de nœuds frères et de nœuds fils ainsi que d'une probabilité P_i qui est une probabilité initiale changeante selon la densité du réseau. Puisque les informations du voisinage sont différentes pour chaque nœud du réseau, la probabilité de retransmission diffère d'un nœud à un autre.

L'algorithme proposé passe par trois étapes :

- Les nœuds obtiennent des informations sur les nœuds de leur voisinage grâce aux messages HELLO ;
- Ils déterminent leur niveau dans l'arborescence et estiment leur relation avec tous leurs voisins ;
- Les nœuds calculent leurs probabilités de retransmission en se basant sur le nombre de leurs nœuds frère et leurs nœuds fils. Après chaque nœud rediffuse le paquet

en fonction de sa probabilité.

Hyocheol et al. ont constaté la présence de certains problèmes dans l'application de l'algorithme précédent. En effet, dans un environnement réaliste la topologie du réseau change ainsi la relation d'un nœud avec ses voisins ne peut pas toujours être maintenue. En théorie, chaque nœud peut déterminer sa relation avec chacun de ses voisins après la première diffusion, alors qu'en réalité ce n'est pas toujours le cas puisque des pertes de messages peuvent survenir à cause des collisions fréquentes.

Dans le but de résoudre ces problèmes Hyocheol et al. ont proposé une amélioration pour cet algorithme. Pour son amélioration, deux nouvelles fonctionnalités ont été apportées. La première est le calcul de la probabilité qu'un nœud voisin peut être parent, frère ou encore fils. Cette probabilité est calculée durant les cinq premières opérations d'inondation, contrairement à la première solution où on utilise qu'une inondation pour la découverte des relations entre les voisins. Choisir cinq inondations est due au fait qu'il n'y a pas un grand changement après la cinquième, qu'à partir de là on peut obtenir des relations de voisinage stables. La deuxième consiste en l'utilisation d'un temps d'attente aléatoire avant chaque retransmission, pour éviter les envois simultanés de messages, ainsi le nombre de collisions est minimiser.

o **Discussion**

L'application de cet algorithme réduit considérablement le nombre de messages dupliqués grâce à l'utilisation de la notion de probabilité de retransmission. L'utilisation d'un temps d'attente aléatoire évite l'occurrence de collisions. De ce fait, le nombre de messages qui sont bien transmis est plus important. Cependant à cause de ce même temps d'attente l'achèvement du processus de diffusion nécessite un temps plus important en comparaison avec le temps nécessaire pour la diffusion directe. Pour le calcul de la probabilité de retransmission il faut cinq opérations d'inondation, cela peut être pénalisant pour le réseau en termes d'énergie, alors que dans un réseau de capteur sans fil c'est la ressource la plus critique.

2. Protocole Broadcast Algorithme with Less Redandancy (*BALR*)

Dans le but de réduire la redondance lors de la diffusion et maximiser la durée de vie du réseau de capteur sans fil, les auteurs Zhao et al. dans [39] ont proposé l'algorithme BALR pour résoudre ce problème.

BALR est conçu dans le but d'obtenir des performances de diffusion satisfaisantes dans un réseau de haute densité et à grande échelle. Il intègre deux stratégies basées sur la distance et le degré de couverture afin d'optimiser la sélection de nœuds de rediffusion. BALR est un algorithme localisé où chaque nœud prend la décision de rediffuser selon son information locale à un saut.

Pour réduire la rediffusion redondante, le nombre de redirecteurs induits de chaque

nœud doit être réduit au minimum. BALR tient en considération l'efficacité de la rediffusion et l'énergie résiduelle en tant que nouvelles métriques pour calculer pour chaque nœud son propre retard avant la rediffusion. Chaque nœud doit être au courant de la position de ses voisins à un saut. Dans le cas idéal, le paquet diffusé est livré le long d'une longueur de bord hexagone égal au rayon de couverture de chaque nœud. Tous les nœuds rediffuseurs sont situés au niveau des sommets de l'hexagone qui sont appelées positions idéales.

Dans le cas réel, des nœuds peuvent se situer en dehors des positions idéales. En effet, les points les plus proches des points idéales sont choisis comme nœuds de transition. BALR intègre ces paramètres pour former une nouvelle métrique. Par la suite, un modèle de somme pondérée est utilisé comme un mécanisme d'auto retard pour compléter la rediffusion.

Selon la stratégie basée sur la distance, seul les voisins avec une distance spécifiée l_t à partir de l'une des positions idéales ont le droit de retransmission.

Pour la stratégie basée sur la couverture, elle est définie comme le nombre de voisins qui n'ont jamais reçus le paquet diffusé. A fin de minimiser les retransmissions, les auteurs ont proposé que pour chaque nœud il doit maintenir son degré de couverture et rediffuser seulement lorsque ce degré est au-dessus du seuil d_T .

o Discussion

Après simulation et l'analyse des performances, BALR a arboré une amélioration importante par rapport aux résultats des protocoles ML2B, BSP et inondation, tel que tant que la densité du réseau augmente, son efficacité augmente et prolonge la durée de vie du réseau.

Cependant, ce document ne tient pas compte du réseau de capteur sans fil composé de nœuds qui dorment et se réveillent, mais considère que le RCSF est homogène, constitué de nœuds qui ont des portées de transmission identiques et qui sont toujours actif jusqu'à l'épuisement de leur batterie.

2.4.6 Diffusion avec ajustement de la portée et connaissance de voisinage

Des protocoles de diffusion avec ajustement de portée ont été conçus ; cet ajustement est effectué dans le but de définir une portée de transmission optimale r . Cela peut répondre à la contrainte d'énergie dont dépendent les réseaux de capteurs sans fil.

Comme exemple de travaux effectués dans cet axe, nous citons ceux de F.Ingelrest dans [16]. En effet, Ingelrest a essayé de définir une portée qui pourrait être optimale pour les transmissions de chaque nœud du réseau. Ingelrest a considéré une surface S

rectangulaire, sur laquelle sont déployés les nœuds capteurs. Il a choisit un recouvrement hexagonal connexe pour paver S . La longueur d'un coté d'hexagones est fixée à r , les n émetteurs sont placés au sommet de chaque hexagone. Une valeur importante de r , permet à chaque émetteur de couvrir une part importante de S , ce qui réduit la valeur de n . A l'inverse, une faible valeur de r augmente celle de n .

Une formule pour le calcul de r a été présentée dans [16]. Il est montré que cette portée optimale est la même dans le cas ou le coût énergétique des réceptions est pris en compte ou qu'il ne l'est pas.

2.5 Classification des techniques de diffusion étudiées

Une classification des différents protocoles discutés précédemment est présentée dans le tableau suivant :

Classes \ Protocoles	Connaissance de voisinage	Ajustement de portée
1. Diffusion aveugle	Non	Non
2. Qayyum	Oui	Non
3. Lhaisini	Oui	Non
4. BOPP	Oui	Non
5. CDSEP	Oui	Non
6. RDS-MPR	Oui	Non
7. eRDS-MPR	Oui	Non
8. BALR	Oui	Non
9. P-GRAB	Non	Non
10. Trame de résumé	Non	Non
11. Ingelrest	Oui	Oui
12. Hybride	Oui	Non

TABLE 2.1 – Classification des différents protocoles de diffusion dans les réseaux de capteurs.

L'étude des protocoles de diffusion nous a permis de les classer en différentes catégories. En effet, cette classification peut varier selon l'environnement du réseau étudié, de sa topologie et des conditions imposées lors de la conception du protocole. A titre d'exemple, le RDS-MPR est un protocole qui requiert la connaissance du voisinage et qui est sans ajustement de portée. Il peut y avoir des protocoles qui appartiennent à des catégories qui sont des hybridations de deux classes différentes ou plus.

2.6 Etude comparative entre les techniques de diffusion étudiées

Dans ce qui suit est présentée une étude comparative entre les différents protocoles présentés précédemment selon les critères suivants :

2.6.1 Taux de diffusion

C'est l'accessibilité, elle représente le pourcentage de nœuds couverts i.e. le taux de nœuds recevant le message par rapport au nombre total de nœuds dans le réseau.

2.6.2 Consommation d'énergie

C'est le taux d'énergie consommée durant le processus de diffusion.

2.6.3 Nombre de messages rediffusés

Le nombre de messages retransmis impliquant des réceptions redondantes.

2.6.4 Temps de réponse

Il représente la latence, c'est le temps entre l'émission depuis la source et la dernière réception du message de diffusion.

2.6.5 Perte de paquets

C'est le taux ou le nombre de messages perdus lors de la diffusion du à plusieurs facteurs par exemple l'occurrence de collisions.

Le tableau.2 présente une étude comparative entre les différents protocoles étudiés.

Critères \ Protocoles	Taux diffusion	Consommation d'énergie	Nombre messages réémets	Temps de repense	Perte de paquets
1. Diffusion aveugle	Important	Elevée	Important	Moyen	Elevée
2. Qayyum	Bon	Moyenne	Réduit	Moyen	Basse
3. Lhaisini	Moyen	Réduite	Moyen	Moyen	Basse
4. BOPP	Bon	basse	Moyen	Bas	Basse
5. CDSEP	Bon	Basse	Réduit	Moyen	Basse
6. RDS-MPR	Important	Elevée	Réduit	Moyen	Basse
7. eRDS-MPR	Important	Elevée	Réduit	Moyen	Basse
8. BALR	Bon	Réduite	Bas	Bas	Basse
9. P-GRAB	Bon	Basse	Bas	Bas	Basse
10. Trame de résumé	Important	Moyenne	Bas	Elevé	Basse
11. Ingelrest	Bon	Basse	Bas	-	Basse
12. Hybride	Important	Basse	Moyen	Bas	Basse

TABLE 2.2 – Comparaison entre les différents protocoles de diffusions dans les réseaux de capteurs.

D'après la table ci-dessus, établie à partir de l'étude des différents protocoles de diffusion cités précédemment, on peut déduire qu'un protocole peut être bon selon certains critères et mauvais selon d'autres. Cela nous mène à dire qu'il est difficile de concevoir un protocole efficace répondant à l'ensemble de ces critères. D'autant plus que les réseaux de capteurs sans fil pour lesquels ces protocoles ont été conçus sont régis par de nombreuses contraintes.

2.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons fait une étude détaillée des différentes techniques de diffusions dans les réseaux de capteurs sans fil et des concepts sur lesquels elles sont basées. Nous avons classé ces techniques selon qu'elles prennent en considération la connaissance de voisinage ou pas, et le fait qu'elles ajustent ou non la portée de communication. Quoiqu'il existe des solutions efficaces lorsque la portée est fixe, il est aussi intéressant de se pencher vers le cas avec ajustement.

Cette analyse nous a permis de tirer profits des différentes méthodes de diffusion, et de proposer un protocole de diffusion pour les RCSFs. Ce protocole prend en compte les spécificités de ces réseaux en termes d'énergie et de portée de communication. Il fera le sujet du chapitre suivant.

Protocole de diffusion MPR avec ajustement de la portée ($MPR-r/R$)

3.1 Introduction

Le protocole MPR a été largement utilisé pour la diffusion dans les RCSFs. Ce protocole ne prend pas en considération l'ajustement de la portée de communication "r", quoiqu'il est intéressant d'étudier le cas où cette dernière est prise en compte.

Dans ce chapitre, nous présentons un protocole de diffusion avec deux variantes, qui se basent sur le protocole MPR.

La première variante MPR-r : consiste en l'application de la portée présentée par Ingrest dans [16], considérée comme optimale pour la sélection des MPR et la diffusion.

La deuxième variante MPR-R : utilise une portée calculée à partir du modèle énergétique le plus utilisé.

Le but de ce protocole, est de sélectionner les MPRs capables d'assurer une diffusion efficace tout en minimisant la consommation énergétique globale.

3.2 Motivations

Les réseaux de capteurs sont déployés aléatoirement dans des environnements qui peuvent être hostiles. De ce fait, aucune intervention humaine ne peut être apportée en cas de panne ou d'épuisement de la batterie qui est une ressource très limitée.

La diffusion d'informations dans les réseaux de capteurs est largement utilisée pour assurer de nombreuses fonctionnalités (*clustering, maintien de la topologie, routage, .. etc*). Cependant, cette technique doit être accomplie tout en tenant compte des ressources limitées des capteurs. Vu la densité de ces réseaux, une information peut être captée et

retransmise par plusieurs nœuds capteurs. Ces retransmissions sont le plus souvent inutiles et mènent à l'épuisement de la batterie. Pour cela, plusieurs techniques de diffusion sont implémentées dans la littérature des réseaux de capteurs.

Dans notre travail, on s'intéresse à la méthode utilisant les nœuds relais (MPR) avec ajustement de la portée d'émission. Dans ce contexte, nous proposons un protocole avec ajustement de la portée. Ce protocole s'appuie sur l'utilisation d'une portée optimale et fixe pour tout le réseau. Selon cette portée, nous proposons deux approches. Ces deux dernières ont pour objectif une meilleure exploitation du réseau tout en préservant son énergie globale.

3.3 Le protocole MPR

Pour que la diffusion soit efficace, il faudrait garantir que tous les voisins à deux sauts d'un nœud reçoivent correctement le message. Donc, si ce procédé est exécuté efficacement dans un réseau connexe alors tous les nœuds pourront être joints (*accessibles*) à partir du nœud source [24].

L'approche des MPRs fait partie des protocoles dépendants de la source. Dans le but d'atteindre un taux de couverture maximum, un ensemble des voisins à un saut sera choisi pour joindre les voisins à deux sauts de la source. Par la suite, tout nœud désigné comme relais doit exécuter cet algorithme à son tour.

Cependant, l'ensemble des nœuds relais doit être optimal pour pouvoir atteindre tous les voisins à deux sauts en minimisant le coût énergétique de cette opération. Pour cela, plusieurs variantes de ce protocole ont été proposées. A notre connaissance, aucune de ses propositions ne prend en considération la notion de l'ajustement de la portée pour élire les nœuds relais. De ce fait, notre travail vise à exploiter cette notion de MPR avec une portée optimale.

3.4 Le protocole MPR-r/R

3.4.1 Idée de base

Lorsque l'ajustement de portée est pris en compte lors de la diffusion, il est nécessaire d'adopter un modèle énergétique capable d'évaluer la consommation $C(u)$ d'un émetteur u en fonction de la portée de communication $r(u)$ qu'il utilise.

Le modèle énergétique le plus courant, cité dans [16], est le suivant :

$$C(\mathbf{u}) = r(\mathbf{u}) \quad (3.1)$$

Cependant, comme la mentionné Ingrest dans [16], ce modèle ne prend pas en considération les coûts indépendants de la portée de communication, comme celui de la préparation du message, de son traitement par la couche MAC ou encore de la probabilité de réémission. Alors, le modèle avec lequel nous allons travailler considère qu'à chaque émission est associée un coût minimum quelle que soit la portée utilisée, il est défini dans [16] comme suit :

$$C(\mathbf{u}) = \begin{cases} r(\mathbf{u}) + C_e & \text{si } r(\mathbf{u}) \neq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

L'utilisation de faibles portées mènent à une augmentation du nombre de relais nécessaires à la couverture d'une zone donnée, donc un grand nombre d'ajout successif de la constante C_e . Au final, bien que la dépense énergétique par chaque nœud ait été minimisée, la consommation globale peut ne pas être minimale.

3.4.2 Phase de découverte de voisinage

Lors du déploiement du réseau, un message d'initialisation est envoyé par la station de base. Chaque nœud capteur diffuse un message contenant ses coordonnées de position et reste à l'écoute des messages envoyés par ses voisins. Ainsi, chaque nœud i peut calculer son degré grâce au nombre de messages reçus ainsi que la distance $d(i,j)$ le séparant d'un nœud j tel que $j \in V_1(i)$ et cela en utilisant les coordonnées géographiques. Cette phase de découverte de voisinage n'est exécutée qu'une seule fois lors du déploiement du réseau afin que chaque nœud puisse calculer son degré et la distance le séparant de ses voisins à un saut.

Avant de détailler le déroulement du protocole MPR - r, nous allons définir la terminologie utilisée dans ce protocole dans le tableau suivant :

Notation	Signification
E_{init}	L'énergie initiale, elle est la même pour tous les nœuds
E_{Ri}	L'énergie courante ou résiduelle d'un nœud i
$E_{émis}$	L'énergie nécessaire pour l'envoi d'un message
E_{recep}	L'énergie nécessaire pour la réception d'un message
Deg_i	Le nombre de voisin du nœud i
V_i	La liste des voisins de i tel que $Deg_i = \text{card}(V_i)$
$d(i,j)$	La distance euclidienne entre un nœud i et son voisin j
$Poids_i$	C'est une valeur calculée pour la prise de décision
E_{seuil}	L'énergie nécessaire pour supporter une période

TABLE 3.1 – Tableau des notations utilisées dans le protocole MPR-r/R.

3.4.3 Description détaillée du protocole MPR-r/R

Nous présentons dans ce qui suit les deux variantes de notre protocole, MPR-r et MPR-R qui améliorent les performances de MPR. Leur objectif est d'assurer une diffusion maximale avec un nombre de messages redondants minimal et une moindre consommation énergétique.

La première étape du protocole MPR, sert à couvrir les nœuds isolés, est maintenue dans les deux approches, le changement est apporté au niveau de la fonction du calcul du poids et donc de la deuxième étape.

3.4.3.1 Protocole MPR-r

En se basant sur ce modèle énergétique décrit par l'équation (3.2), Ingrest dans [16] a calculé la portée r qu'il a considéré comme optimale. Cette même portée que nous allons appliquer dans le protocole MPR-r est obtenue comme suit :

$$r = \sqrt[\alpha]{(2C_e/\alpha - 2)} \quad (3.3)$$

α : facteur d'atténuation du signal.

1. Sélection des nœuds MPRs

Les nœuds MPRs sont ceux qui vont servir de relais entre l'émetteur et ses voisins à deux sauts. Grâce à la phase de découverte de voisins, chaque nœud connaît l'ensemble de ses 1-voisins et de ses 2-voisins.

La sélection de ces nœuds sera effectuée suivant le degré, l'énergie résiduelle et la distance qui les sépare du nœud source. Ainsi, le poids de chaque nœud sera calculé selon la fonction suivante :

$$P(\mathbf{u}) = D(\mathbf{u}) * E(\mathbf{u}) * d(\mathbf{u}) \quad (3.4)$$

Tel que :

$D(\mathbf{u})$: Le degré du nœud \mathbf{u} qui représente le nombre de ses 1-voisins.

$E(\mathbf{u})$: L'énergie résiduelle (restante).

$$E(\mathbf{u}) = \text{Energie}_{\text{départ}} - \text{Energie}_{\text{consommée}} \quad (3.5)$$

$d(\mathbf{u})$: La distance entre le nœud source et le nœud \mathbf{u} tel que : $d(\mathbf{u}) < r$.

- Si $d(\mathbf{u}) > r$ pour un 1-voisin, le message de diffusion lui sera transmis par relais.

Une description détaillée du processus de sélection est donnée comme suit :

- (a) Commencer avec ensemble vide $S(\mathbf{u})$ et $S_1(\mathbf{u}) = V_2(\mathbf{u})$;
- (b) Sélectionner les nœuds de $S_1(\mathbf{u})$ qui n'ont qu'un parent dans $V_1(\mathbf{u})$, les enlever de $S_1(\mathbf{u})$ et ajouter leurs parents à $S(\mathbf{u})$;
- (c) Tant qu'il existe des nœuds dans $S_1(\mathbf{u})$ faire :
 - Calculer le poids de chaque nœud dans $V_1(\mathbf{u}) \cap S(\mathbf{u})$
 - Ajouter le nœud v possédant le poids maximal à $S(\mathbf{u})$. S'il y a plus d'un nœud qui ont le poids maximal, le nœud ayant l'énergie résiduelle maximale sera choisi. Retirer les $V_1(\mathbf{u})$ de $S_1(\mathbf{u})$.

2. Processus de diffusion

Le processus de diffusion n'est effectué que par les nœuds appartenant à l'ensemble des MPR. Au final, nous aurons le protocole de diffusion suivant :

• Protocole MPR-r

- (a) Sélection des nœuds MPRs comme défini précédemment ;
- (b) Un nœud \mathbf{u} ayant un message à diffuser, l'envoie avec la portée r à son MPR et attend un temps aléatoire qui est généré en fonction du nombre de voisins :
 - Si au bout de ce temps, un nœud de $V_1(\mathbf{u})$ n'a pas reçu le message alors :
 - La rediffusion sera effectuée ;
 - Sinon
 - Elle sera annulée
- (c) Le nœud MPR émet avec la même portée aux 2-voisins de \mathbf{u} , attend aussi un temps aléatoire, et après réémet si c'est nécessaire.

3.4.3.2 Protocole MPR-R

La différence entre cette variante et la première réside dans le fait que les portées de communication utilisées ne sont pas les mêmes. Pour avoir la portée optimale utilisée dans cette variante, on procède de la manière suivante :

Nous considérons une surface carrée S . Les émetteurs seront disposés sur S de telle manière qu'en effectuant une diffusion aveugle, toute la surface sera entièrement couverte.

Nous définissons deux paramètres qui vont être pris en compte :

n : Le nombre d'émetteurs à placer sur S .

r : La portée d'un émetteur.

Pour pouvoir paver la surface S , nous choisissons de la découper en carrés, aux sommets des quels seront placés les émetteurs. La longueur d'un côté de chaque carré sera fixé à r , cela permettra d'éviter l'apparition de trous dans la couverture.

– Le nombre d'émetteurs n dépend de la valeur de r .

En effet, on remarque que :

1. Une valeur trop élevée de r , permet à chaque émetteur de couvrir une surface plus importante, ce qui réduit la valeur de n .
2. Une faible valeur de r , augmente celle de n .

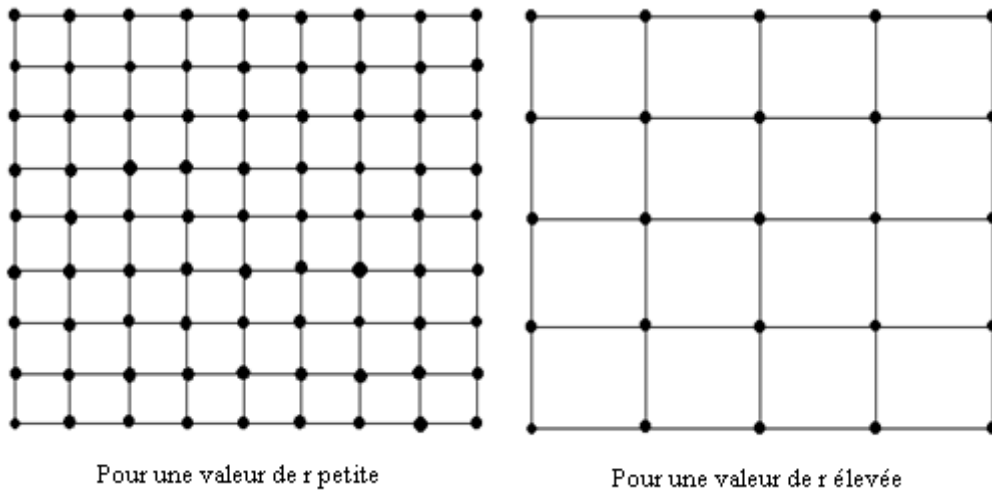


FIGURE 3.1 – Pavage carré connexe de la surface S pour deux valeurs différentes de r .

Calculer le nombre d'émetteurs nécessaire pour couvrir S revient à calculer le nombre de carrés nécessaire pour paver celle-ci.

Le nombre de carrés peut être calculé en divisant l'air de la surface S sur l'air d'un carré :

$$\text{Nombre carré} = \text{aire de } S / \text{aire d'un carré} = S / r^2 \tag{3.6}$$

On remarque qu'avec ce nombre de nœuds, deux cotés de la surface S ne seront pas couverts. Le nombre de nœuds nécessaires pour couvrir ces cotés est donné par l'équation suivante :

$$n' = 2\sqrt{S}/r + 1 \tag{3.7}$$

Le nombre total d'émetteurs qui doivent être disposés sur la surface S est obtenu grâce à la formule suivante :

$$n = \text{nombre de carrés} + n' = S / r^2 + 2\sqrt{S}/r + 1 \tag{3.8}$$

Il ne reste plus qu'à déterminer la valeur de la portée optimale r pour laquelle la dépense énergétique globale durant la diffusion sera minimale.

En utilisant l'équation (3.2), nous pouvons calculer la consommation énergétique C(r) d'une diffusion avec une portée r :

$$C(r) = n(r^\alpha + C_e) = (S/r^2 + 2\sqrt{S}/r + 1)(r^\alpha + C_e) \tag{3.9}$$

La portée de communication optimale r est donc celle qui minimise C(r) en fonction des constante α et C_e . En procédant par résolution graphique, on obtient $r = 79$.

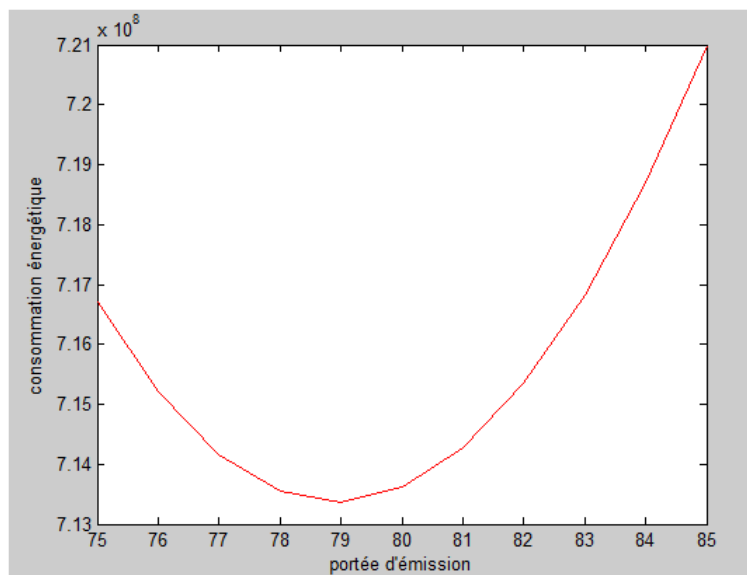


FIGURE 3.2 – Consommation énergétique d'une diffusion ($\alpha = 4$, $C_e = 10^8$ et $S = 10000$).

La figure (3.2) illustre la consommation énergétique d'une diffusion sur notre pavage carré avec le modèle $\alpha = 4$, $C_e = 10^8$ et $S = 10000$. On peut voir clairement que la portée optimale pour ce modèle est $r = 79$.

1. Sélection des nœuds MPRs

La sélection des nœuds qui vont servir de relais pour la diffusion suit les mêmes étapes que celles mentionnées dans le protocole MPR-r.

2. Processus de diffusion

Le processus de diffusion est effectué de la même façon que dans le protocole MPR-r, sauf que pour ce protocole la portée d'émission optimale considérée est celle calculée par l'équation (3.8).

3.4.4 Pseudo algorithme

/ Sélection des nœuds imposés */*

1. **Pour** ($i= 1 : \text{card}(V_2(u))$) **faire**
2. **Si** ($\text{deg}(v)=1$ et $v \in V_2(u)$) **alors**
3. $V_1(v) \in \text{MPR}_1$;
4. **Fin si**;
5. **Fin pour**;

/ Sélection des nœuds étant à la portée du nœud émetteur et calculer leur poids */*

6. **Pour** ($i=1 : \text{nbr}$) **faire**
7. **Si** ($d[i] \leq r$) **Alors**
8. $P[i] = D[i] * E[i] * d[i]$;
9. **Fin si**;
10. **Fin pour**;

/ Sélection du nœud MPR ayant le poids maximum */*

11. **Répéter**
12. $P_{\max} = P[1]$;
13. **Pour** ($i=2 : P.\text{lenght}$) **faire**
14. **Si** ($P[i] > P_{\max}$) **alors**
15. $P_{\max} = P[i]$;
16. $N = i$;
17. **Fin si**;
18. **Fin pour**;

/ Le nœud ayant le numéro N est élu comme MPR₁ */*

19. Ajouter U_N à l'ensemble MPR;
20. Retirer $V_2(U_N)$ de $V_2(v)$;

21. **Jusqu'à** ($V_2(v) = \emptyset$);
/ Générer une attente aléatoire T */*
22. $T = 1 \setminus \text{deg}(v)$;
/ L'envoi du message */*
23. **Si** ($u \in V_1$) **alors**
24. **Si** reception (msg) de MPR1 **alors**
25. Envoi (ACK) à MPR₁;
26. **Sinon**
27. **Si** Timeout (T) **alors**
28. Envoi (msg) à u;
29. **Fin si**;
30. **Fin si**;
31. **Fin si**;

3.4.5 Organigramme de fonctionnement

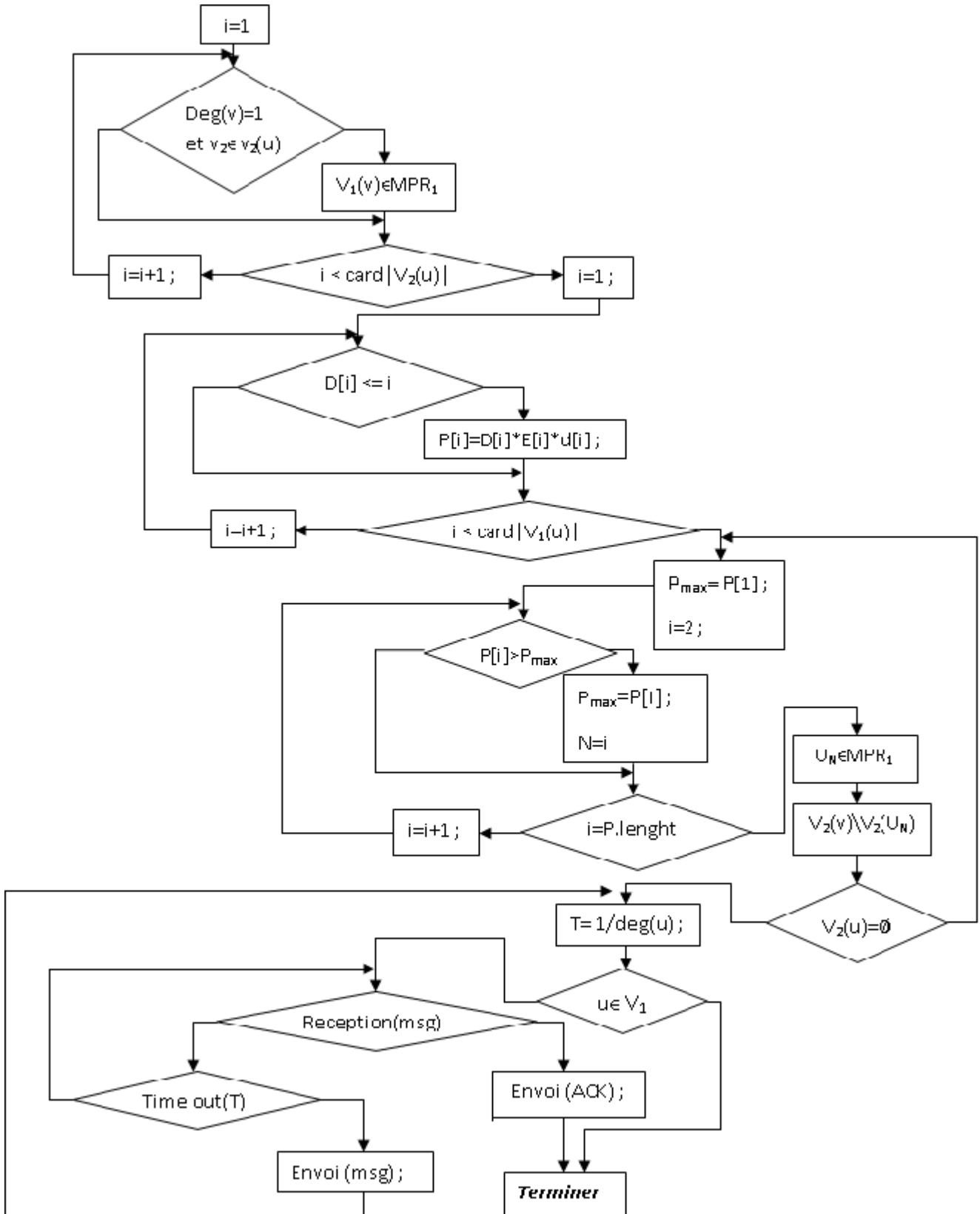


FIGURE 3.3 – Organigramme de fonctionnement du protocole MPR-r/R.

3.5 Exemple

Pour expliciter la technique de diffusion proposée, nous supposons avoir une zone d'intérêt totalement couverte par vingt nœuds capteurs déployés aléatoirement. Initialement, tous les capteurs sont dotés d'un même niveau d'énergie.

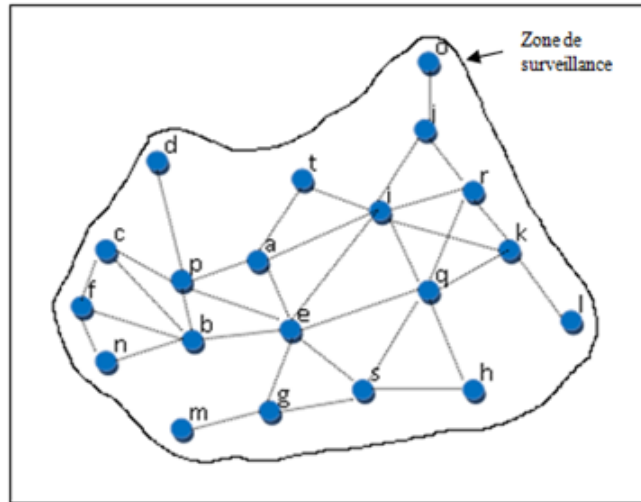


FIGURE 3.4 – Exemple de réseau sans fil présenté par un graphe non orienté.

Dans notre exemple, nous supposons que l'énergie initiale de chaque capteur est de 10 joules et qu'une émission d'un message coûte 0.2 joules et sa réception coûte 0.1 joule. Après la phase de découverte de voisinage nous avons obtenu les informations du *tableau 3.2* :

Nœuds	1-voisins	AVG-dist	2-voisins	Deg	E_{init}	E_{emis}	E_{recep}
a	p, e, i, t	15.25	b, c, d, g, s, q, j, r, k	04	10	0.8	0.4
b	e, p, c, f, n	16.6	g, s, q, i, a, d	05	10	0.1	0.5
c	p, b, f	15.33	a, b, d, e, n	03	10	0.6	0.3
d	P	15	a, b, c, e	01	10	0.2	0.1
e	g, s, q, i, a, p, b	17.14	m, h, r, k, t, j, c, d, f, n	07	1.4	10	0.7
f	n, b, c	14.66	e, p	03	10	0.6	0.3
g	m, s, e	15.33	h, q, i, a, p, b	03	10	0.6	0.3
h	s, q	15.5	g, e, i, r, k	02	10	0.4	0.2
i	a, t, j, r, k, q, e	16.57	p, o, l, h, s, g, b	07	10	1.4	0.7
j	o, r, i	16.33	k, q, a, t, e	03	10	0.6	0.3
k	l, q, i, r	14.5	h, s, e, a, t, j	04	10	0.8	0.4
l	k	18	r, q, i	01	10	0.2	0.1
m	g	20	s, e	01	10	0.2	0.1
n	b, f	15	e, p, c	02	10	0.4	0.2
o	j	16	r, i	01	10	0.2	0.1
p	a, b, c, d, e	16.16	i, t, f, n, g, s, q	05	10	0.1	0.4
q	h, s, e, i, r, k	15.66	g, a, p, b, t, j, l	06	10	1.2	0.6
r	k, j, i, q	12.25	l, o, a, t, e, h, s	04	10	0.8	0.4
s	g, h, q, e	14.5	m, i, r, k, a, p, b	04	10	0.8	0.4
t	a, i	16	p, e, j, r, k, q	02	10	0.4	0.2

TABLE 3.2 – Résultats de la phase de découverte de voisins.

Tous les capteurs ont le même rayon de communication étant choisi comme optimal suivant la méthode d'Ingelrest [30] ou selon les protocoles que nous avons proposé ($MPR-r/R$). Etant donné la portée optimale est 20 mm sur le graphe représentant notre réseau. Supposons que le nœud b veut diffuser un message M1 :

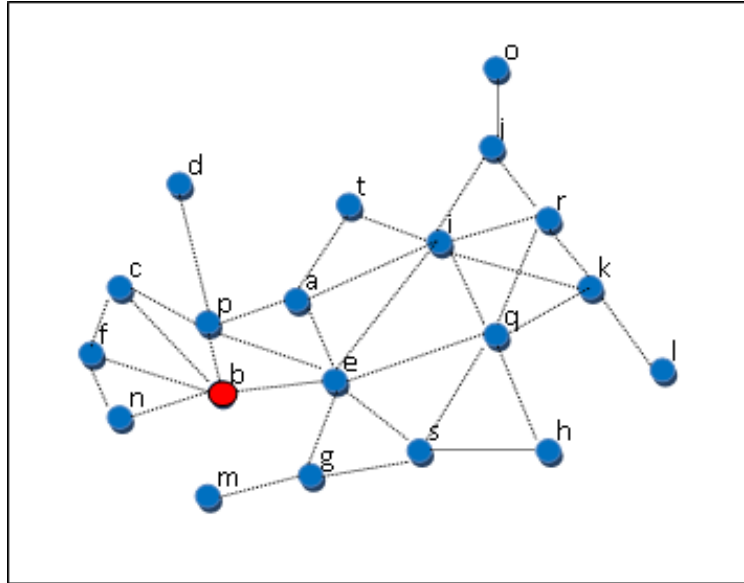


FIGURE 3.5 – Le nœud b diffuse le message M1.

- **1^{ère} phase** : Le nœud b transmet son message à ses voisins à un saut. Initialement l'ensemble des MPRs est vide.

(a) **1^{ère} étape : Vérification de l'existence des nœuds imposés**

Dans cette phase nous allons vérifier si l'un des voisins de b à deux sauts est de degré 1. Effectivement, en parcourant l'ensemble des 2-voisins, on remarque que le nœud d est de degré 1. D'où, le nœud p est MPR. Donc, on exclu le nœud p de l'ensemble des 1-voisins

- (b) **2^{ème} étape : Calcul du poids** Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Nœuds	Deg	E_{Ri}	$d(i,j)$	Poids _i
e	7	7.9	20	1106
c	3	9.1	18	491.4
f	3	9.1	16	436.8
n	2	9.4	14	263.2

TABLE 3.3 – Calcul du poids pour les voisins de b.

(c) **3^{ème} étape : Selection des MPRs**

Le nœud dont le poids est le max des poids des 1-voisins est élu comme MPR et sera ajouté à l'ensemble des MPRs. Pour notre exemple le capteur e est devenu MPR.

(d) *4^{ème} étape : envoi de messages*

Le nœud b envoie le message à ses 1-voisins(c, f, n), y compris les nœuds MPR sélectionnés (p, e), puis il marque une attente aléatoire.

(e) *5^{ème} étape : attente d'ACK*

Durant la période d'attente le nœud b reste en écoute. Si le nœud b reçoit 5 ACK alors la retransmission du message ne sera pas effectuée. Sinon le nœud b réémet le message.

- Retirer les nœuds (e, p, c, f, n) de l'ensemble des nœuds ayant pas encore eu le message de diffusion.

- L'ensemble des nœuds non informé n'est pas vide alors les nœuds sélectionnés comme étant MPRs vont exécuter l'algorithme.

- **2^{ème} phase** : Les nœuds p et e vont diffuser le message que b leur a envoyé en même temps.

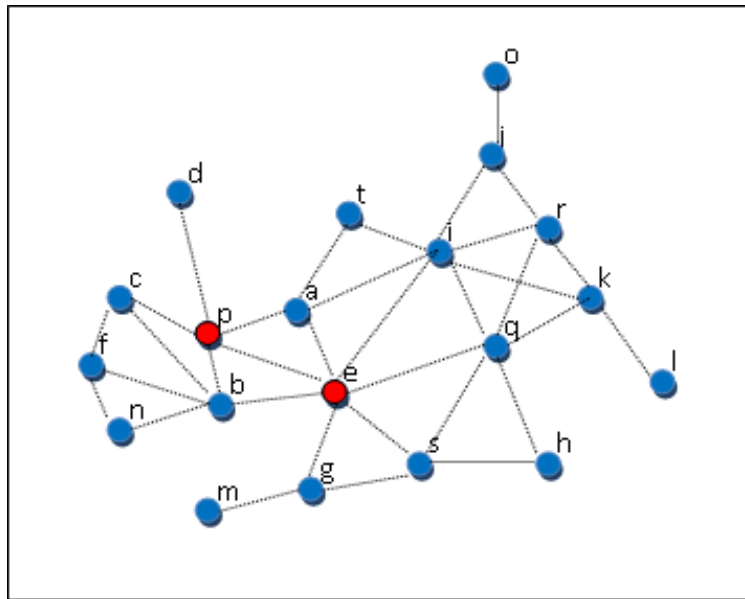


FIGURE 3.6 – Les nœuds p et e diffusent.

o **Pour le nœud p :**(a) *1^{ère} étape : Vérification de l'existence de nœuds imposés*

D'après les 2-voisins de p, il n'y a pas de voisins dont le degré est égal à 1. Donc, pour cette étape l'ensemble des MPRs est vide.

(b) *2^{ème} étape : Calcul du poids*(c) *3^{ème} étape : Sélection de MPR*

Selon la fonction de sélection des MPR le nœud a est devenu MPR.

Nœuds	Deg	E_{R_i}	$d(i,j)$	Poids _i
d	1	9.7	15	145.5
a	3	8.8	12	316.8

TABLE 3.4 – Calcul du poids pour les voisins de p.

(d) **4^{ème} étape : envoi de messages**

Le nœud p envoie le message à ses 1-voisins (d, a), puis il marque une attente aléatoire.

(e) **5^{ème} étape : attente d'ACK**

Durant la période d'attente, le nœud p reste en écoute. Si le nœud p reçoit 2 ACK alors la retransmission sera annulée. Sinon, il réémet le message.

- Retirer les nœuds (d, a) de l'ensemble des nœuds n'ayant pas encore eu le message de diffusion

o **Pour le nœud e :**(a) **1^{ère} étape : Vérification de l'existence de nœuds imposés**

D'après les 2-voisins de e, nous avons le nœud m qui est de degré 1. D'où le capteur g est ajouté à l'ensemble des MPRs. Nous avons aussi le nœud d mais il est déjà couvert par p.

(b) **2^{ème} étape : Calcul du poids**

Nœuds	Deg	E_{R_i}	$d(i,j)$	Poids _i
i	7	7.9	20	1106
q	6	8.2	20	984
s	4	8.8	14	492.5

TABLE 3.5 – Calcul du poids pour les voisins de e.

(c) **3^{ème} étape : Sélection de MPR**

Selon la fonction de sélection des MPR le nœud i devient MPR. On remarque que h est un voisin de e à deux sauts qui n'est pas couvert. Alors, on sélectionne un autre nœud MPR parmi les voisins à un saut de e. Selon le poids maximal, q devient MPR.

D'où, l'ensemble des MPRs pour cette étape est (g, i, q).

(d) **4^{ème} étape : envoi de messages**

Le nœud e envoie le message à ses 1-voisins (i, q, s, g), puis il marque une

attente aléatoire.

(e) **5^{ème} étape : attente d'ACK**

Durant la période d'attente le nœud e reste en écoute. Si le nœud p reçoit 4 ACK alors la retransmission sera annulée. Sinon il réémet le message.

- Retirer les nœuds (i, q, s, g) de l'ensemble des nœuds n'ayant pas encore eu le message de diffusion.

- L'ensemble des nœuds non informé n'est pas vide, alors, les nœuds sélectionnés comme étant MPRs vont exécuter l'algorithme.

- **3^{ème} phase :** Durant cette phase, les nœuds a, i, q et g vont diffuser le message à leurs 1-voisins.

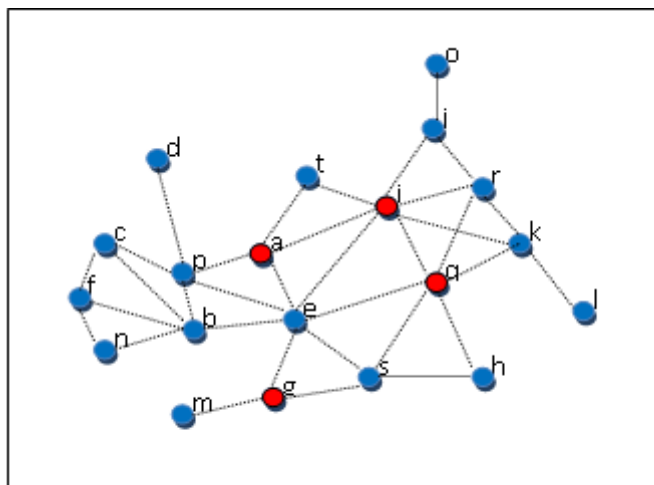


FIGURE 3.7 – Les nœuds a, i, q et g diffusent.

o **Pour le nœud a :**

(a) **1^{ère} étape : Vérification de l'existence de nœuds imposés**

D'après les 2-voisins de a, nous n'avons pas de nœuds de degré 1 non informés. D'où, l'ensemble des MPRs reste vide.

(b) **2^{ème} étape : Calcul du poids**

Nœuds	Deg	E_{Ri}	$d(i,j)$	Poids _i
t	2	9.4	18	338.4

TABLE 3.6 – Calcul du poids pour les voisins de a.

(c) **3^{ème} étape : Sélection de MPR**

Il n'y a pas de MPR à sélectionner.

(d) *4^{ème} étape : envoi de messages*

Le nœud a envoie le message à ses 1-voisins (t), puis il marque une attente aléatoire.

(e) *5^{ème} étape : attente d'ACK*

Durant la période d'attente le nœud a reste en écoute. Si le nœud a reçoit un ACK, alors, la retransmission sera annulée. Sinon, il réémet le message.

- Retirer le nœud t de l'ensemble des nœuds n'ayant pas encore eu le message de diffusion.

o **Pour le nœud i :**(a) *1^{ère} étape : Vérification de l'existence de nœuds imposés*

D'après les 2-voisins de i , on remarque que les nœuds o et l sont de degré 1 et non informés. D'où, les nœuds j et k seront ajoutés à l'ensemble des MPRs.

(b) *2^{ème} étape : Calcul du poids*

Nœuds	Deg	E_{Ri}	$d(i,j)$	Poids _{i}
r	4	8.8	10	352

TABLE 3.7 – Calcul du poids pour les voisins de i .

(c) *3^{ème} étape : Sélection de MPR*

Il n'y a pas de MPR à sélectionner.

(d) *4^{ème} étape : envoi de messages*

Le nœud i envoie le message à ses 1-voisins (r, j, k) puis il marque une attente aléatoire.

(e) *5^{ème} étape : attente d'ACK*

Durant la période d'attente le nœud i reste en écoute. Si le nœud i reçoit 3 ACK alors la retransmission sera annulée. Sinon il réémet le message. -

Retirer les nœuds (r, j, k) de l'ensemble des nœuds n'ayant pas encore eu le message de diffusion.

o **Pour le nœud q :**(a) *1^{ère} étape : Vérification de l'existence de nœuds imposés*

Il n'y a pas de nœuds qui possèdent un degré égal à 1 parmi ses voisins à deux sauts. Donc, il n'y a pas de nœuds imposés. D'où, l'ensemble des MPRs reste vide.

- (b) $2^{\text{ème}}$ étape : *Calcul du poids* Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit.

Nœuds	Deg	E_{R_i}	$d(i,j)$	Poids _i
h	2	9.4	16	300.8

TABLE 3.8 – Calcul du poids pour les voisins de q.

- (c) $3^{\text{ème}}$ étape : *Sélection de MPR*

Il n'y a pas de MPR à sélectionner.

- (d) $4^{\text{ème}}$ étape : *envoi de messages*

Le nœud q envoie le message à ses 1-voisins (h) puis il marque une attente aléatoire.

- (e) $5^{\text{ème}}$ étape : *attente d'ACK*

Durant la période d'attente le nœud q reste en écoute. Si le nœud q reçoit un ACK, alors, la retransmission sera annulée. Sinon, il réemet le message. - Retirer le nœud (h) de l'ensemble des nœuds n'ayant pas encore eu le message de diffusion.

o **Pour le nœud g :**

- (a) $1^{\text{ère}}$ étape : *Vérification de l'existence de nœuds imposés*

Parmi les 2-voisins de g, il n'y a pas ceux qui possèdent un degré égal à 1. D'où, l'ensemble des MPRs reste vide.

- (b) $2^{\text{ème}}$ étape : *Calcul du poids*

Nœuds	Deg	E_{R_i}	$d(i,j)$	Poids _i
s	4	8.8	11	387.2
m	1	9.7	10	194

TABLE 3.9 – Calcul du poids pour les voisins de g.

- (c) $3^{\text{ème}}$ étape : *Sélection de MPR*

Il n'y a pas de MPR à sélectionner.

- (d) $4^{\text{ème}}$ étape : *envoi de messages*

Le nœud g envoie le message à ses 1-voisins m, puis il marque une attente aléatoire.

- (e) $5^{\text{ème}}$ étape : *attente d'ACK*

Durant la période d'attente le nœud g reste en écoute. Si le nœud g reçoit un ACK, alors, la retransmission sera annulée. Sinon, il réémet le message.
 - Retirer le nœud m de l'ensemble des nœuds n'ayant pas encore eu le message de diffusion.

- **4^{ème} phase :** Durant cette phase, les nœuds j et k vont diffuser le message à leurs 1-voisins.

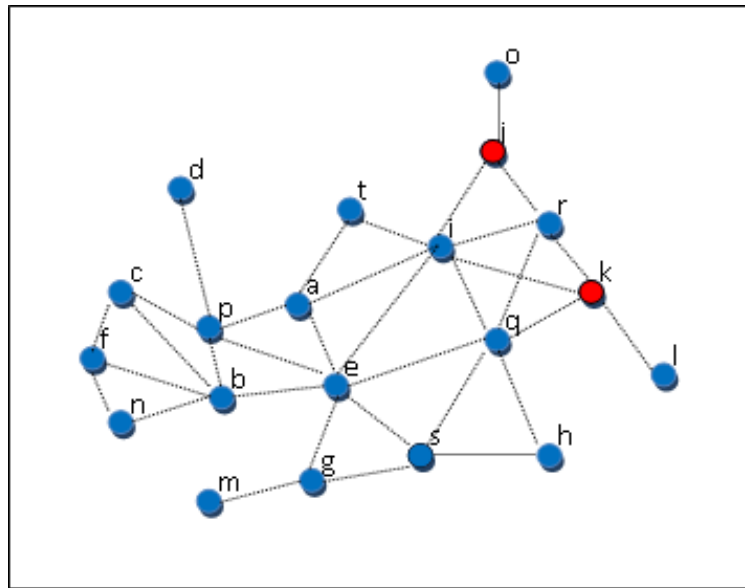


FIGURE 3.8 – Les nœuds j et k diffusent.

o **Pour le nœud j :**

- (a) **1^{ère} étape : Vérification de l'existence de nœuds imposés**

Parmi les 2-voisins de j, il n'y a pas ceux qui possèdent un degré égal à 1. D'où, l'ensemble des MPRs reste vide.

- (b) **2^{ème} étape : Calcul du poids**

Nœuds	Deg	E_{Ri}	$d(i,j)$	Poids _i
o	1	9.7	16	155.2

TABLE 3.10 – Calcul du poids pour les voisins de J.

- (c) **3^{ème} étape : Sélection de MPR**

Il n'y a pas de MPR à sélectionner.

- (d) **4^{ème} étape : envoi de messages**

Le nœud j envoie le message à ses 1-voisins (o) puis il marque une attente aléatoire.

(e) **5^{ème} étape : attente d'ACK**

Durant la période d'attente le nœud j reste en écoute. Si le nœud j reçoit un ACK alors la retransmission sera annulée. Sinon il réémet le message.

- Retirer le nœud o de l'ensemble des nœuds n'ayant pas encore eu le message de diffusion.

o **Pour le nœud k :**(a) **1^{ère} étape : Vérification de l'existence de nœuds imposés**

Il n'y a pas de nœuds qui possèdent un degré égal à 1 parmi ses voisins à deux sauts. Donc, il n'y a pas de nœuds imposés. D'où, l'ensemble des MPRs reste vide.

(b) **2^{ème} étape : Calcul du poids**

Nœuds	Deg	E_{R_i}	$d(i,j)$	Poids _i
1	1	9.7	18	174.6

TABLE 3.11 – Calcul du poids pour les voisins de k.

(c) **3^{ème} étape : Sélection de MPR**

Il n'y a pas de MPR à sélectionner.

(d) **4^{ème} étape : envoi de messages**

Le nœud k envoie le message à ses 1-voisins (1) puis il marque une attente aléatoire.

(e) **5^{ème} étape : attente d'ACK**

Durant la période d'attente le nœud j reste en écoute. Si le nœud k reçoit un ACK alors la retransmission sera annulée. Sinon il réémet le message.

- Retirer le nœud l de l'ensemble des nœuds n'ayant pas encore eu le message de diffusion.

- L'ensemble des nœuds non couverts est vide alors l'algorithme se termine.

3.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté le protocole de diffusion MPR sur lequel se base notre protocole. Notre contribution consiste en l'utilisation de ce protocole en ajustant la portée de communication. Ce protocole est utilisé dans le but de prolonger la durée de vie du réseau et assurer que le processus de diffusion a

été effectué avec succès. Le principe de notre protocole, ses différentes étapes ainsi qu'un exemple ont été présentés.

Le chapitre suivant porte sur l'évaluation de performances de notre protocole MPR-r/R.

Evaluation de performances du protocole MPR-r/R

4.1 Introduction

Après avoir présenté les détails de notre protocole, dans ce qui suit nous présentons une analyse des résultats de son implémentation obtenus par simulation. Le but de ce chapitre est de montrer l'efficacité du protocole MPR-R/r par rapport au protocole MPR en termes de nombre de relais et d'énergie consommée. Pour ce faire, nous définissons les outils nécessaires pour l'implémentation et la simulation de ces protocoles. Ensuite, nous décrivons l'implémentation des différentes étapes des protocoles cités dans le chapitre précédent. Nous terminerons par une présentation des résultats obtenus lors des tests de performances des deux protocoles et une analyse de ces résultats.

4.2 Simulateurs de réseau de capteurs

Plusieurs simulateurs ont été conçus pour les réseaux sans fil :

- **NS2 (*Network Simulator*)** : C'est un simulateur à événements discrets développé à Lawrence Berkeley National Laboratory (*LBNL*). Il s'agit d'une extension de NS conçue pour les réseaux sans fil. Son langage de base est le C++. L'outil Network Animator (*NAM*) associé au simulateur NS permet de visualiser des animations de la simulation (*transfert de paquets d'un nœud à un autre, taille des paquets, remplissage des files d'attente,..etc*).
- **Optimum NETWORK Performance (*OPNET*)** : comme NS, OPNET est un simulateur à événements discrets. C'est un outil très puissant pour la simulation

et l'évaluation de performance d'un réseau. Il permet aussi à l'utilisateur de construire ses propres modèles, des plus simples aux plus complexes.

- **TOSSIM** : C'est le simulateur de TinyOs créée par l'université de Berkeley. Le principal but de TOSSIM est de créer une simulation très proche de ce qui se passe dans les RCSF dans le monde réel. Une économie d'effort et une préservation du matériel sont possibles grâce à cet outil [6].

Pour une compréhension moins complexe de l'activité d'un réseau, TOSSIM peut être utilisé avec une interface graphique TinyViz. Elle permet de donner un aperçu des capteurs à tout instant ainsi que les divers messages qu'ils émettent.

4.3 Le choix de l'environnement de simulation

Matrix laboratory (*MATLAB*) est un langage de développement informatique particulièrement dédié aux applications scientifiques. C'est un langage de programmation basé essentiellement sur le calcul matriciel, avec des fonctionnalités mathématiques et graphiques étendues. Il a été développé par la société *The MathWorks*. Reconnu par sa simplicité, son efficacité et sa grande puissance de calcul, Matlab est classé parmi les langages complet et de haut niveau.

Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou de systèmes linéaires, etc...

Nous avons opté pour Matlab, puisqu'il s'agit d'une application qui a été conçue afin de fournir un environnement de calcul matriciel simple, efficace, interactif et portable et que dans notre simulation nous utilisons beaucoup les matrices.

4.4 Les étapes de simulation

La figure suivante représente les différentes étapes du processus de simulation.

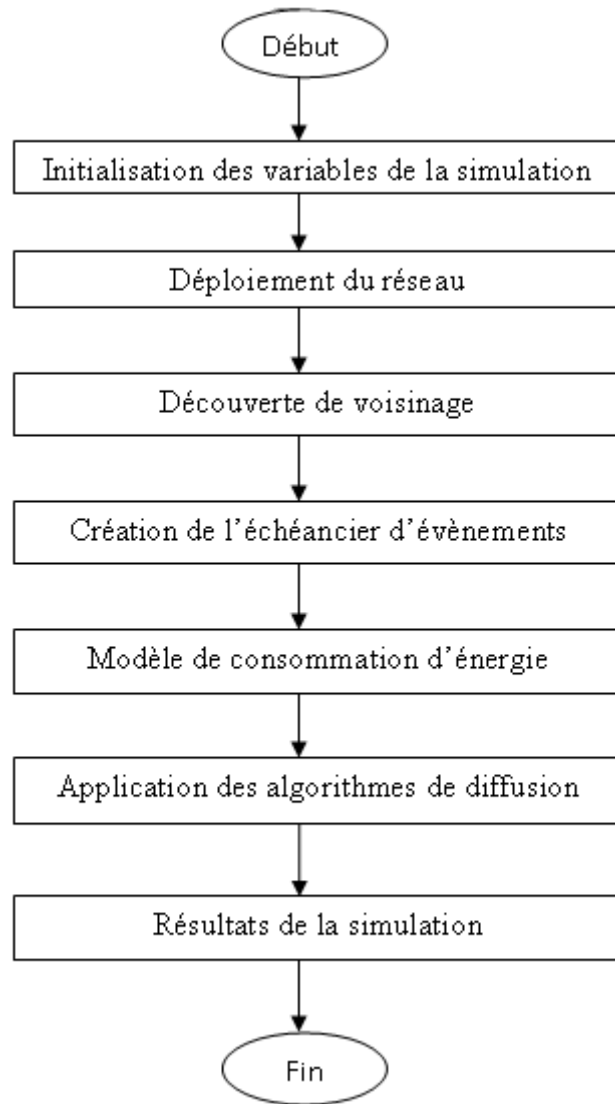


FIGURE 4.1 – Les étapes de la simulation.

4.4.1 Initialisation des variables de simulation

A ce niveau, se fait l'initialisation des variables nécessaires pour la simulation de l'environnement et les protocoles de diffusion. Pour notre simulation, les variables utilisées et leurs initialisations sont présentés dans le tableau 4.1 :

Paramètre	Valeur	Signification
Taille	400	La taille de paquet à envoyer.
E	2	L'énergie initiale.
E_{elec}	0.0000000001	L'énergie électronique.
E_{emp}	0.00000005	L'énergie d'amplification.
S	160000	La surface de la zone d'intérêt.
R_c	40	Le rayon de captage.

TABLE 4.1 – Les paramètres de simulation utilisés.

Lors de notre simulation, nous avons considéré une zone d'intérêt ayant une surface de 160000 m² sur laquelle des capteurs, dotés d'une énergie initiale de 2 joules, et d'un rayon de captage de 40m, sont déployés. La taille des paquets échangés est estimée à 400 octets

4.4.2 Déploiement du réseau

On considère que le déploiement de notre réseau est effectué d'une manière aléatoire dans la zone de captage. Chaque capteur appartenant au réseau est représenté par ses coordonnées (x , y), obtenues grâce à l'utilisation de la fonction *rand*.

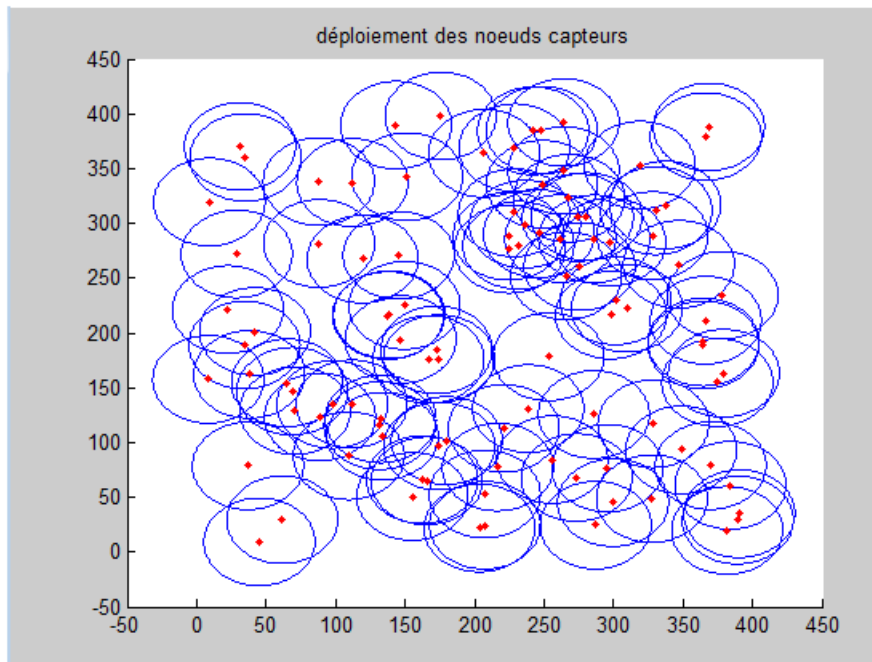


FIGURE 4.2 – Le déploiement des nœuds capteurs dans la zone de captage.

4.4.3 Découverte de voisinage

C'est grâce à une fonction qui permet de retourner la liste des capteurs qui sont à la portée du nœud x que la découverte de voisinages est effectuée. On dit qu'un nœud i est à la portée du nœud j , si la distance les séparant est inférieure ou égale au rayon de communication et donc la portée du signal radio. La distance entre le nœud i et le nœud j est obtenu avec la fonction suivante :

$$d(i, j) = \sqrt{((x(j) - x(i))^2 + (y(j) - y(i))^2)} \quad (4.1)$$

4.4.4 Création de l'échéancier d'évènements

Un échéancier est créé pour la gestion des évènements détectés par les nœuds capteurs. Cet échéancier contient deux champs, un contenant l'identité du nœud ayant capté l'évènement, un autre contenant celle de l'évènement détecté. L'affiliation de ces évènements aux nœuds capteurs se fait d'une manière aléatoire.

4.4.5 Modèle de consommation d'énergie

Heinzelman et al. dans [13] ont proposé un modèle radio de consommation d'énergie (*voir figure 4.3*). Ainsi, les énergies nécessaires pour émettre $E_{T_x}(s, d)$ et recevoir $E_{R_x}(s)$ des messages sont définies comme suit :

- Pour émettre un message de s bits vers un récepteur loin de d mètres, l'émetteur consomme :

$$E_{T_x}(s, d) = E_{T_{x\text{elec}}}(s) + E_{T_{x\text{amp}}}(s, d) \quad (4.2)$$

$$E_{T_x}(s, d) = (E_{\text{elec}} * s) + (E_{\text{amp}} * s * d^2) \quad (4.3)$$

- Pour recevoir un message de s bits, le récepteur consomme :

$$E_{R_x}(s) = E_{R_{x\text{elec}}}(s) \quad (4.4)$$

$$E_{R_x}(s) = E_{\text{elec}} * s \quad (4.5)$$

E_{elec} et E_{amp} représentent respectivement l'énergie de transmission électronique et d'amplification (*voir figure 4.3*)

4.4.6 Application des algorithmes de diffusion

Cette étape consiste à implémenter les protocoles de diffusion. Dans notre cas, il s'agit du protocole MPR de base du notre protocole MPR-r/R. Le premier sera implémenté dans le but de faire une comparaison avec le second. Pour faire cette implémentation, les résultats des premières étapes seront exploités.

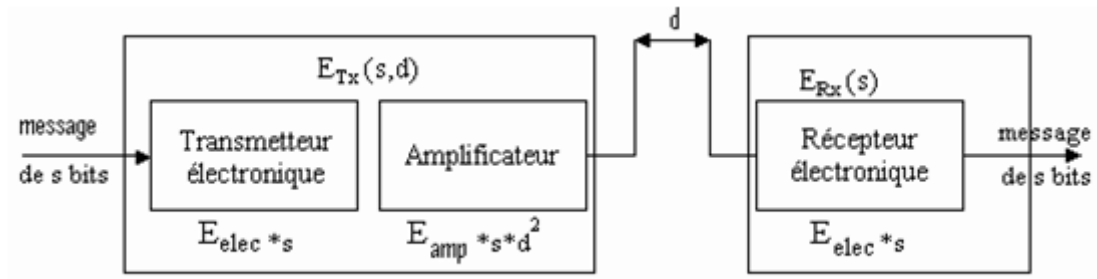


FIGURE 4.3 – Modèle de consommation d'énergie.

4.4.7 Résultats de la simulation

Cette étape est la plus importante de la partie simulation. A ce niveau, les résultats de la simulation seront obtenus selon des métriques bien spécifiques évoquées au dessus. Ces résultats seront interprétés et comparés. C'est dans cette étape que les performances de notre protocole seront évaluées et son efficacité sera prouvée.

4.5 Evaluation de performances de protocole MPT-r/R

Les métriques d'évaluation de performances et les résultats de notre simulation seront présentés dans ce qui suit :

4.5.1 Les métriques de performances du protocole MPR-r/R

Les métriques que nous avons prises en considération lors de notre simulation sont : le nombre de nœuds relais, l'énergie résiduelle et l'énergie moyenne consommée.

4.5.1.1 Le nombre de nœuds relais

Représente le nombre de nœuds relais nécessaires dans le réseau pour relayer un ensemble d'évènements détectés par les nœuds capteurs.

4.5.1.2 L'énergie résiduelle

C'est l'énergie restante dans tout le réseau après avoir diffuser un certain nombre d'évènements.

4.5.1.3 L'énergie moyenne consommée

L'énergie moyenne consommée par l'ensemble des nœuds du réseau, elle est obtenue à partir du rapport énergie consommée sur le nombre total de nœuds.

4.5.2 Discussion des résultats de simulation

Après avoir calculé la portée de transmission optimale qui est de 79, nous estimons la consommation énergétique due à la transmission avec cette même portée. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus en utilisant la portée de transmission considérée comme optimale par Ingrest dans [16]. La figure (4.4), illustre les résultats de la comparaison.

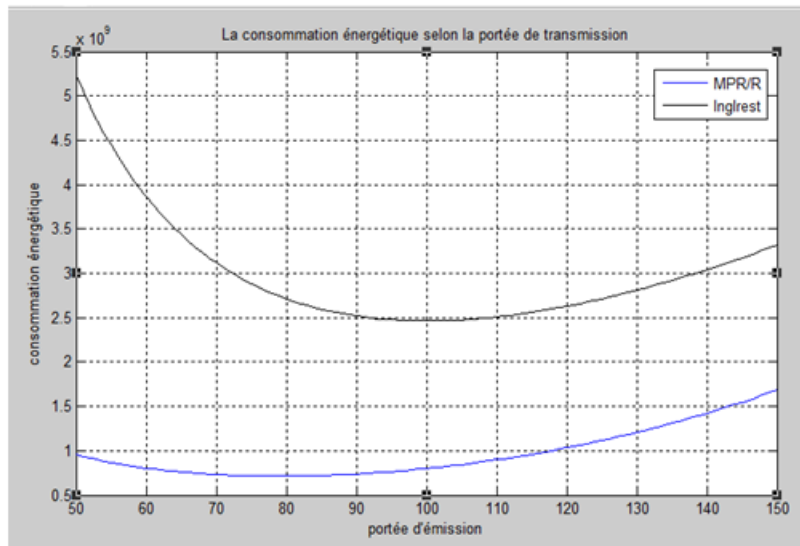


FIGURE 4.4 – Consommation énergétique selon la portée de transmission.

La figure 4.4 montre la différence énergétique entre les deux protocoles, Ingrest et MPR-R. Nous pouvons remarquer que cette énergie est beaucoup moins importante dans le cas du protocole MPR-R. En effet, elle est de $7.13e+008$ lorsque la portée que nous avons calculé est utilisée et de $2.46e+009$ lorsque celle de Ingrest est utilisée. L'utilisation du protocole MPR-R permet de réduire la quantité d'énergie consommée, et donc de prolonger la durée de vie du réseau.

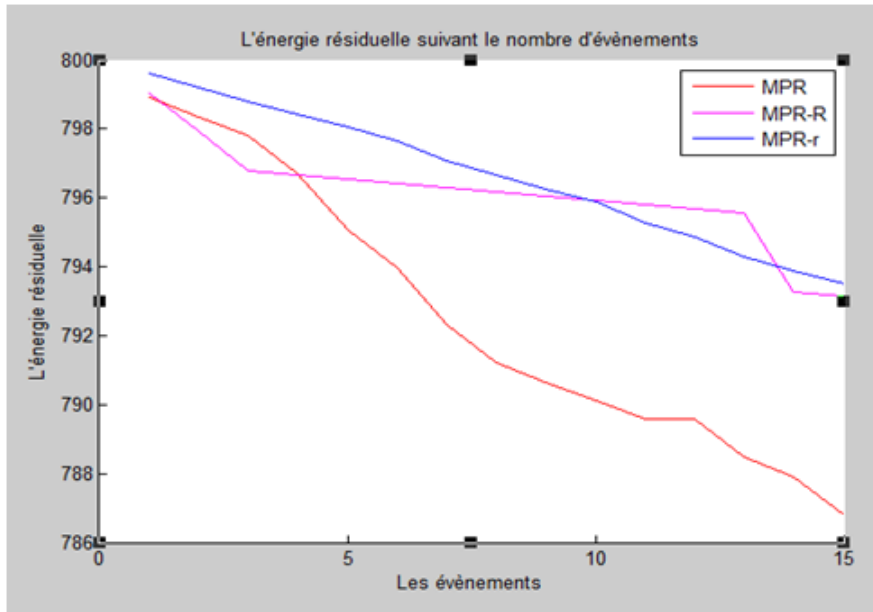


FIGURE 4.5 – L'énergie résiduelle suivant le nombre d'évènements.

La figure 4.5 montre l'énergie résiduelle du réseau en fonction des évènements. On remarque que l'énergie résiduelle obtenue pour les protocoles MPR-R et MPR-r beaucoup élevée comparée à celle du protocole MPR de base. Pour les deux premiers protocoles, il y a des variations dans cette énergie, mais l'écart entre eux n'est pas très important.

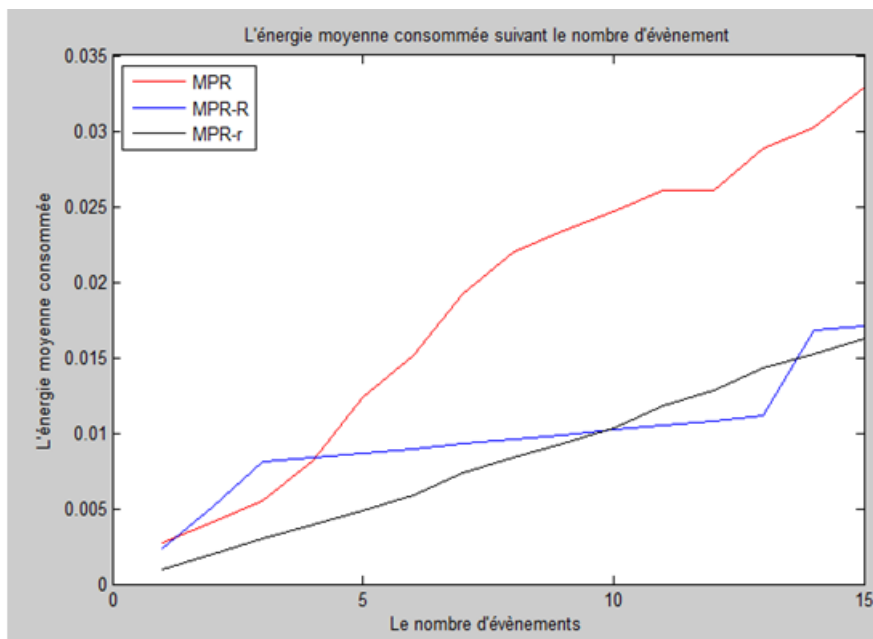


FIGURE 4.6 – L'énergie moyenne consommée suivant le nombre d'évènements.

L'énergie moyenne consommée est obtenue en évaluant l'énergie résiduelle (Fig.4.5) au niveau de chaque nœud, cela après chaque évènement détecté. La figure (4.6), nous montre l'évolution de cette énergie suivant le nombre d'évènements. Au début, cette énergie est presque la même pour les trois protocoles. Avec l'augmentation du nombre d'évènements, l'énergie moyenne consommée diffère d'un protocole à un autre. En effet, nous remarquons une augmentation importante de cette énergie pour le protocole MPR de base, tandis que pour les protocoles MPR-R et MPR-r cette augmentation est moins significative et il y a peu d'écart entre eux.

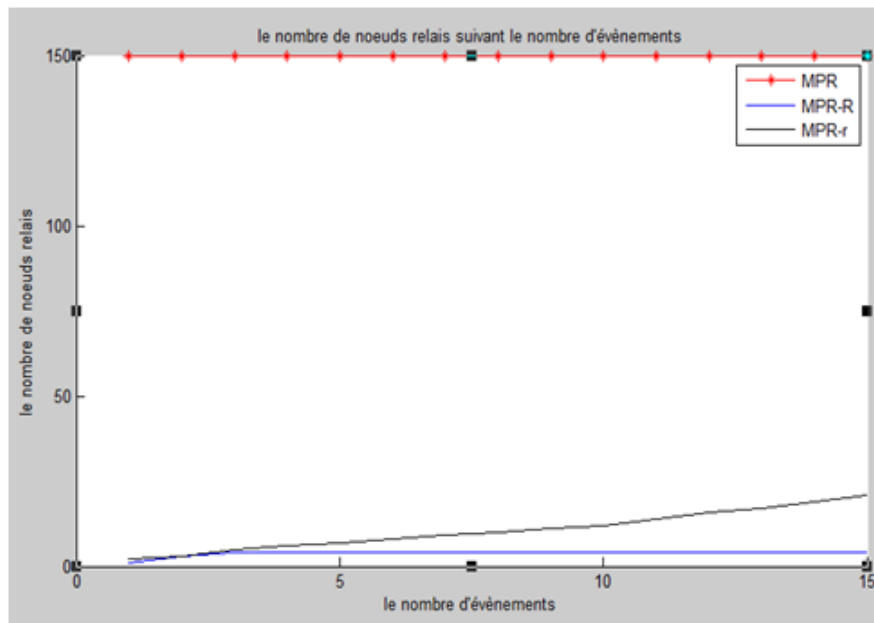


FIGURE 4.7 – Le nombre de nœuds relais suivant le nombre d'évènement.

La figure 4.7 nous présente le nombre de relais nécessaire pour relayer un certain nombre d'évènements. Nous remarquons que le nombre de nœuds relais pour le protocole MPR est très important, et qu'il est fixe par rapport à la variation du nombre d'évènements. En contre partie, ce nombre est beaucoup moins significatif dans le cas des protocoles MPR-R et MPR-r. En effet, il est de 5 nœud relais pour le premier, et de 18 pour le second.

4.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté l'environnement et les différentes étapes de simulation, les résultats de cette dernière ainsi que les métriques d'évaluation de performances prise en considération pour avoir ces derniers. Les résultats que nous avons obtenus montrent l'efficacité des protocoles MPR-R et MPR-r en termes d'énergie par rapport aux protocoles MPR de base.

Conclusion générale

Une nouvelle thématique de recherche vient pour enrichir le domaine des réseaux et des télécommunications, les réseaux de capteurs sans fil. Ces réseaux sont capables de collecter des informations dans des endroits hostiles et surveiller différents événements qui y surgissent. La capacité réduite des nœuds de ces réseaux en termes de calcul, mémoire et d'énergie font une particularité émergente de ce nouveau type de systèmes distribués. La contrainte énergétique représente un point critique dans les RCSFs. Les recherches se focalisent donc, dans la majorité des cas, sur la gestion énergétique.

Durant la réalisation de ce travail, nous avons effectué des recherches qui nous ont permis de constater l'importance des réseaux de capteurs sans fil et leur utilisation. Plusieurs travaux ont été menés par des chercheurs dans ce domaine, d'où l'existence de divers protocoles de diffusion destinés à bien transmettre l'information.

Pour résoudre la problématique de gestion de la consommation énergétique, nous avons étudié et traité différentes techniques de diffusions existantes dans la littérature. Ce qui nous a permis d'élaborer un état de l'art sur ces travaux.

Afin d'optimiser la collecte et le transfert de données dans la zone couverte par les nœuds capteurs, nous avons proposé un protocole de diffusion MPR-r/R avec deux variantes, basées sur l'utilisation des nœuds relais MPR tout en ajustant la portée de transmission.

En effet, pour la réalisation de notre protocole nous nous sommes penchés sur le critère d'ajustement de la portée de transmission. Nous avons utilisé un pavage carré de la zone d'intérêt pour définir une portée optimale de transmission, que nous avons obtenue par la méthode graphique. La portée que nous avons obtenue est utilisée par les nœuds du réseau pour chaque émission ou réception. Après simulation, les résultats obtenus montrent l'efficacité de notre protocole en termes d'énergie et du nombre de nœuds relais. Le protocole MPR-R/r, porte un gain d'énergie non négligeable à

l'ensemble du réseau et donc permet d'allonger la durée de vie de ce dernier.

Etant donné la diversité des domaines d'application des réseaux de capteurs, de nombreuses problématiques restent à résoudre afin de les exploiter dans des cas réels. Dans notre mémoire nous avons eu recours à la méthode graphique pour résoudre l'équation énergétique et ainsi obtenir la valeur optimale de la portée. Comme perspectives, nous envisageons de faire une résolution par la méthode analytique, ce qui nous permettra d'avoir une formule mathématique pour le calcul de cette portée optimale. D'autre part, la mobilité des nœuds capteurs est un critère que nous entrevoyons d'intégrer dans notre protocole.

Bibliographie

- [1] M. Achir. Technologies basse consommation pour les réseaux ad-hoc. *Institut National Polytechnique de Grenoble*, juillet 2005.
- [2] I. Akyildiz, W. SU, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. A servey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102-116, 2002.
- [3] I. Akyildiz, W. SU, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks : A survey. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422, March 2002.
- [4] J. Al-Karaki and A. Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks : a survey. *IEEE Wireless Communications*, Vol. 11, No. 6, pp. 6-28, December 2004.
- [5] A. Bachir. Allongement de la durée de vie des réseaux sans fil de capteurs par l'optimisation des protocoles de routage et d'accès au canal. *Thèse doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble*, 2007.
- [6] M. Badnet and N. Belloir. Réseaux de capteurs : Mise en place d'une plateforme de test et d'expérimentation. *Master Technologie de l'Internet 1ère année, France*, 2006.
- [7] W. Bechkit. Un nouveau protocole de routage avec conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. *Memoire de magistère, Ecole nationale Supérieure d'Informatique (E.S.I)*, février 2000.
- [8] K. Bouabdellah. Problématique de la consommation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. *Séminaire LIUPPA, Université de Pau et des Pays de l'Adour*, Octobre 2007.
- [9] D. Boubiche. Protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil. *Me-moire de magistère, Université de batna*, 2008.

-
- [10] M. Brahma. Étude de la qos dans les réseaux ad hoc : Intégration du concept de l'ingénierie du trafic. *Université de Haute Alsace des sciences et techniques*, Decembre 2006.
- [11] L. Castel and Y. Zekri. Optimisation par colonie de fourmis pour le routage dans les réseaux de capteurs. *Memoire d'ingénieur, Université des sciences et technologie Houari Boumediene*, Août 2007.
- [12] C. Castelluccia and A. Francillon. Protéger les réseaux de capteurs sans fil. *INRIA*, 2008.
- [13] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishman. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceeding of the 33rd Hawaii International Conference on System Science*, 2000.
- [14] K. Holger and A. Willig. Protocols and architectures for wireless sensor networks. *Wiley*, 2005.
- [15] M. Ilyas and I. Mahgoub. Hand book of the sensor networks : Compact wireless and wired sensing systems. 2005.
- [16] F. Ingelrest. Protocoles localisés de diffusion et économie d'énergie dans les réseaux ad hoc et de capteurs. *Thèse doctorat, Université des sciences et technologies de Lille*, 2006.
- [17] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin. Directed diffusion : A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. *Proceeding of ACM MobiCom 2000, Boston*, pp. 56-67, 2000.
- [18] K. J-Runser and C. Comaniciu. A probabilistic interference and energy aware gradient broadcasting algorithm for wireless sensor networks. *IEEE*, 2008.
- [19] H. Jeong, J. Kim, and Y. Yoo. Adaptive broadcasting method using neighbor type information in wireless sensor networks. *Sensor, Vol. 11*, pp. 5952-5967, 2011.
- [20] R. Kacimi. Technique de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. *Thèse doctorat, Institut National Polyclinique de Toulouse*, 2009.
- [21] I. Khelladi and N. Badache. Les réseaux de capteurs : état de l'art. *Rapport de recherche, laboratoire LSI USTHB*, février 2004.
- [22] A. Kies, Z. Maaza, and R. Belbachir. A connected dominating set based on connectivity and energy in mobile ad hoc networks. *University of Sciences and the Technology of Oran, Vol. 9, No. 5*, 2012.
- [23] A. Kumar and K. Wong. A preamble-based broadcasting technique for wireless ad hoc sensor networks. *Communications and Network, Vol. 3*, pp. 73-84, 2011.

-
- [24] M. Lehsaini, H. Guyennet, and M. Feham. Mpr-based broadcasting in ad hoc and wireless sensor networks with a realistic environment. *International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 6, No. 10, Octobre 2007.
- [25] R. Meraihi. Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ad hoc. *Thèse doctorat, Ecole nationale supérieure des télécommunications, TELECOM Paris*, 2003.
- [26] T. Moulahi, S. Nasri, and H. Guyennet. Broadcasting based on dominated connecting sets with mpr in a realistic environment for wsns ad hoc. *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 35, pp. 1720-1727, 2012.
- [27] C. Ni and T. Hsiang. A power-preserving broadcast protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Sensor Networks*, 2009.
- [28] E. Petriu, N. Georganas, D. Petriu, D. Makrakis, and V. Groza. Appareils d'information à base de capteurs. *EEE Instrumentation et mesure Magazine*, pp. 31-35, 2000.
- [29] G. Pottie and W. Kaiser. Wireless integrated network sensors. *Communication of the ACM*, 2000.
- [30] A. Qayyum, L. Viennot, and A. Laouiti. Multipoint relaying for flooding broadcast messages in mobile wireless networks. *Proceeding of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2002.
- [31] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, and M. Srivastava. Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 40-50, 2002.
- [32] C. Rez. Wireless ad hoc and sensor networks. *University of Oulu, Finland*, 2004.
- [33] Y. Romdhane. Evaluation des performances des protocoles s-mac et directed diffusion dans les réseaux de capteurs. *Ecole supérieure des communications de Tunis*, 2007.
- [34] S. Talbi. Développement d'un protocole de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. *Mémoire de magistère, Université A.M.Bejaia*, 2008.
- [35] A. Tanebaum. Computer networks, 4th edition. *Amsterdam Libre University, Pearson Education*, 2003.
- [36] Y. Tseng, S. Ni, Y. Chen, and J. Sheu. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. *Wireless Networks*, Vol. 8, pp. 153-167, 2002.
- [37] J. Vaudour. Élaboration de couches mac et réseau pour un réseau de capteurs. *mémoire d'ingénieur I.I.E*, 2006.
- [38] D. Yubo, N. Jianwei, and L. Lian. Modeling of broadcasting based on distance scheme for wsn. *IEEE computer society*, 2009.

- [39] R. Zhao, X. Chen, Z. Jiang, and H. Wang. Broadcasting with least redundancy in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, pp. 11, 2012.

Résumé

Déployé dans des environnements hostiles, les réseaux de capteurs sans fil sont soumis à une contrainte énergétique qui est une ressource critique pour ce type de réseaux. La collecte de données, étant la principale fonction des nœuds capteurs, pour faire acheminer ces données à la destination, un nombre important de communications coûteuses en termes d'énergie est nécessaire. Par conséquent, les protocoles utilisés doivent être efficaces et économes en énergie pour prolonger la durée de vie du réseau. Le processus de diffusion peut s'avérer très gourmand en énergie, cela à cause de l'information redondante et des collisions concurrentes.

Dans notre travail, nous avons étudié différents protocoles de diffusion existants dans la littérature. Nous avons proposé une nouvelle classification de ces différents protocoles et une étude comparative de ces derniers. Pour remédier au problème d'énergie dans la diffusion, nous avons proposé un protocole de diffusion MPR-R/r avec ajustement de la portée de transmission qui se base sur le protocole MPRs. Après avoir calculé la portée optimale de transmission, la sélection des nœuds MPRs se fait selon une fonction de calcul du poids des voisins à un saut du nœud diffuseur. Les résultats de simulation ont prouvé l'efficacité du protocole MPR-R/r en termes d'énergie. En effet, notre protocole permet de minimiser le nombre de nœuds relais ce qui prolonge la durée de vie du réseau.

Les mots clés : Diffusion, RCSF, Énergie, MPR, Portée.

Abstract

Often deployed in hostile environments, wireless sensor networks are subjected to an energy constraint that is a critical resource for these types of networks. The main function of nodes sensors is the data collection. To send data to the destination, a large number of communications widely greed of energy is needed. As a result, the broadcasting protocols must be efficient and economical in energy to extend the lifetime of the network. The broadcasting process can be very intensive energy, that because of the redundant information and occurring collisions.

In our work, we have studied several broadcasting protocols existing in literature. We have proposed a new classification of these protocols and a comparative study of these. To solve the problem of energy in broadcasting, we propose a broadcasting protocol with adjustment transmission range which is based on the MPR protocol. After calculating the optimum transmission range, the selection of the MPR nodes is according to a function for calculating the weight of one hop neighbors of the di?user node.

The simulation results showed the effectiveness of MPR-R/r protocol in terms of energy. Indeed, our protocol minimizes the number of relay nodes which prolongs the life of the network.

keywords : Broadcasting, WSN, Energy, MPR, Range.