

République Algérienne Démocratique et Populaire

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira



Département Génie électrique

Mémoire de master

Filière : Télécommunication

Option : Système Des Télécommunications

Réalisé par :

M. Maiche Ahmed

M. Hassaine Mohamed

Thème :

*Les performances des protocoles de
routage visant la Qos dans les réseaux de
capteurs sans fil*

Devant le jury:

Président : M.CHELBLIS

Université de Bouira

Examineur : M. NOURINE .M

Université de Bouira

Encadreur : M. ROUAM.R

Université de Bouira

Co-encadreur :MEDJEDOUB.S

Université de Bouira

Année universitaire : 2019 / 2020

Remerciements

Toute la gratitude et le merci au mon Dieu notre créateur qui nous a donné la force pour terminer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier vivement notre promoteur Dr Medjedoub.S et Rouam.R pour ces conseils, orientations et sa disponibilité le long de l'élaboration de ce travail.

Une pensée pleine de reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation pendant toute la durée de nos études, afin d'acquérir ce modeste savoir.

Nous remercions les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

Nous remercions également toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail en particulier nos parents.

Dédicaces

Ce modeste travail est dédié à :

À Mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

À tous mes frères et sœurs

À toutes ma famille et mes proches.

À tous mes amis sans exception

À Tous mes chers enseignants qui m'ont enseigné.

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Ahmed

Dédicaces

Je dédie ce travail à,

Mes très chers parents pour leurs soutient moral et financier et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études, en leur espérant une longue vie et que dieu les gardes.

À mes chers frères, sœurs, source de joie Et de bonheur

À toute ma famille de près ou de loin sans exception.

Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis le primaire à ce jour.

À toute mes amis surtout mon binôme et a tous qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.

Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment.

Mohamed

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des abréviations	vii
Liste des abréviations	viii
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteur sans fil	3
1.1 Introduction	3
1.2 Réseau de capteur sans fil	3
1.2.1 Définition d'un RCSF	3
1.2.2 Architecture d'un réseau de capteur sans fil	4
1.2.3 Capteur sans fil	5
1.2.4 Type des capteurs sans fil	7
1.2.5 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil	10
1.3 Contraintes de conception d'un réseau	11
1.4 Consommation d'énergie :	11
1.5 Domaine d'application des RCSFs	12
1.6 Communication dans les RCSF	13
1.6.1 Pile protocolaire	13

1.7	Conclusion	14
2	Routage dans les réseaux de capteur sans fil	15
2.1	Introduction	15
2.2	Collecte d'informations dans les RCSF	16
2.2.1	Collecte d'informations à la demande	16
2.2.2	Collecte d'informations suite à un événement	16
2.3	Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil	17
2.3.1	Classification selon la structure de réseau	18
2.3.2	Classification selon le fonctionnement de protocole	24
2.3.3	classification selon l'établissement de route	36
2.4	Conclusion	40
3	Speed basé sur basse consommation d'énergie (Speed Based on Low Energy Consumption)	41
3.1	Introduction	41
3.2	Le protocole proposé	41
3.2.1	Hypothèse	43
3.2.2	Principe de fonctionnement	43
3.3	Conclusion	53
4	Évaluation des performances	54
4.1	Introduction	54
4.2	Simulateurs de réseau de capteur sans fil	54
4.2.1	NS-3 (Network Simulator)	54
4.2.2	OMNeT++	55
4.2.3	AVRORA	55
4.2.4	OPNET (Optimum NETWORK Performance)	55
4.3	Environnement de simulation	55
4.3.1	Paramètres de simulation	56
4.3.2	Description du système	56
4.3.3	Variables descriptives du système	57
4.4	Evaluation des performances du protocole	57
4.4.1	Déploiement des nœuds	58

4.4.2	Sélection des chefs des zones	58
4.4.3	Energie restante dans chaque nœud après d’envoi un nombre des messages	59
4.4.4	Energie restante dans les chefs des zones après l’envoi un nombre des messages	60
4.4.5	La variation d’énergie en fonction de nombre des messages durant le changement du CZ.	61
4.4.6	Comparaison de notre protocole et le protocole Flooding	62
4.5	Conclusion	63
	Conclusion générale	64
	Bibliographie	66
	Annexe 1	71
	Annexe 2	72

Table des figures

1.1	Un réseau de capteur sans fil.	4
1.2	Architecture d'un réseau de capteur sans fil.	5
1.3	Un capteur sans fil	6
1.4	Architecture d'un capteur	6
1.5	Transmetteur.	8
1.6	Récepteurs.	8
1.7	Récepteurs.	9
1.8	Enregistreurs de données.	9
1.9	Emetteurs-récepteurs.	10
1.10	Les domaines d'application dans les RCSF	12
1.11	pile protocolaire	13
2.1	Collecte d'informations à la demande.	16
2.2	Collection orientée événement	17
2.3	Classification des protocoles de routage.	18
2.4	problème d'implosion.	19
2.5	problème d'overlap.	20
2.6	Technique hiérarchique.	21
2.7	exemple sur le GAF.	24
2.8	Architecture fonctionnelle du protocole SPEED	25
2.9	Paquet de localisation	26
2.10	Calcule vitesse de livraison.	27
2.11	choix de nœud de prochain saut.	28

2.12 Paquet « Delay Back pressure »	29
2.13 Procédure de re-routage pour délai « Delay back pressure rerouting » (cas 1)	30
2.14 Procédure de re-routage pour délai « Delay back pressure rerouting » (cas 2)	31
2.15 Mécanisme de Void avoidance.	32
2.16 Phases de communication du protocole Directed Diffusion.	34
2.17 le protocole SPIN.	35
2.18 Classification selon établissement de route	36
2.19 la propagation de requête RREQ.	39
2.20 le chemin pris par RREP.	40
3.1 Formation des zones.	44
3.2 envoie les données capturées au chef de zone.	48
3.3 ordonancement TDMA.	48
3.4 outage des données inter-zone.	51
4.1 Déploiement du réseau dans la zone de captage.	58
4.2 sélection des chefs des zones.	59
4.3 Energie restante dans chaque nœud après l’envoi un nombre de message.	60
4.4 énergie restante dans les CZs	61
4.5 rotation de CZ	62

Liste des tableaux

4.1	Paramètres de simulation.	56
4.2	Paramètres de simulation.	57
4.3	Comparaison de notre protocole et le protocole Flooding	63

Liste des abréviations

RCSF	Réseau de capteur sans fil
WSN	Wireless Sensor Network
ADC	Convertisseurs Analogique-Numérique
MAC	Media Access Control.
SPIN	Sensor Protocols For Information Via Negotiation
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Dierarchy.
PEGASIS	Power-E.Cient Gathering In Sensor Information Systems
TEEN	Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
APTEEN	Adaptive Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
GEAR	Geographic And Energy Aware Routing
SAR	Sequential Assignment Routing
DSDV	Destination-Sequenced Distance-Vector
OLSR	Optimized Link State Routing
AODV	Ad-Hoc On-Demand Distance Vector
ZRP	Zone Routing Protocol
SHARP	Hybrid Adaptive Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks
TDMA	Time Division Multiple Access.
CDMA	Code Division Multiple Access
GPS	Global Positioning System
IP	Internet Protocole
MFR	Most Forward Within Radius
QOS	Qualité Of Service

Liste des abréviations

ID	Identificator
DATA	information
ACK	Acquittement
EWMA	Exponential weighted moving average
SNGF	Stateless Non-Deterministic Geographic Forwarding
FSF	Forwarding Candidate Set Of Node F
DCF	Distributed Coordination Function
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
ADV	ADVertissing
REQ	REQuest
AODV	Ad Hoc On-Demand Distance Vector
RREQ	Route Request
RREP	Route Response
SHARP	Hybrid Adaptive Routing Protocol For Mobile Ad Hoc Networks
CZS	Chefs Des Zones
SB	Station De Bas

Introduction générale

Depuis leur création, les réseaux de communication sans fil ont connu un succès sans cesse croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles. Grâce à ses divers avantages, cette technologie a pu s’instaurer comme acteur incontournable dans les architectures réseaux actuelles.

Au cours de la dernière décennie, une nouvelle architecture a vu le jour : les réseaux de capteurs sans fil ou en anglais Wireless Sensor Network (WSN), se compose d’un grand nombre de nœuds qui communiquent via des liaisons sans fil. Ils sont répartis sur une zone pour mesurer une grandeur physique telle que la température, la pression...etc.,. Puis, d’effectuer des traitements sur les données recueillies avant de coopérer entre eux pour les acheminer vers un centre de contrôle appelé station de base (on anglais Base Station). Dans un tel réseau, chaque nœud est un dispositif électronique doté de capacités de traitement, de stockage, de communication et d’énergie.

En raison de leurs caractéristiques très variées et de leur faible coût de production, les RCSF sont largement utilisés dans plusieurs domaines, du militaire au médical, en passant par l’industrie . . . etc. Pour ce faire, les RCSF constituent un champ de recherche très large et en pleine croissance. Par conséquent, mener des recherches dans ce domaine nécessite la connaissance d’une série de concepts généraux.

Le routage est le problème majeur dans les réseaux de capteurs sans fil car il n’y a pas d’infrastructure qui gère les informations échangées entre les différents nœuds du réseau. En fait, dans ce type de réseau, chaque nœud joue deux rôles différents, l’un pour capter les événements d’un environnement et l’autre pour l’acheminement de l’information vers une certaine destination.

Le problème majeur dans les réseaux de capteurs sans fil ou est l’énergie consommée

par le nœud de capteur, ce dernier étant doté d'une batterie ni rechargeable ni remplaçable. Il est donc nécessaire d'avoir une stratégie efficace qui prend en compte l'énergie du réseau pour augmenter sa durée de vie du réseau.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les principaux protocoles de routage dans les RCSFs afin de proposer un nouveau protocole de routage qui vise d'améliorer la qualité de service dans les RCSFs. De Ce fait nous organisons ce travail en quatre chapitres comme se suite :

- Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les réseaux de capteurs avec une description de leurs architectures et leurs caractéristiques principales ainsi que leurs domaines d'application. Nous discuterons également les principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs.
- Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter les différentes classes des protocoles de routage, et nous citons également quelques protocoles de routage qui peuvent nous aiderons dans notre proposition.
- Dans le troisième chapitre nous allons représenter notre contribution qui consiste un nouveau protocole de routage à basse consommation d'énergie pour les RCSFs. il porte une combinaison entre la Qos et la minimisation de la consommation d'énergie.
- Dans le quatrième chapitre, nous allons présenter les résultats d'évaluation de notre protocole effectué à travers Matlab.

Généralités sur les réseaux de capteur sans fil

1.1 Introduction

Dans le domaine des télécommunications, les RCSF représentent un domaine de recherche actif avec de nombreux ateliers et conférences organisés chaque année. Dans ce chapitre nous allons présenter un aperçu général sur les RCSF tel que leur définition, leurs caractéristiques, leurs applications ainsi que les défis envisagés.

1.2 Réseau de capteur sans fil

Un réseau de capteurs sans fil est l'une des technologies de la nouvelle génération de réseaux informatiques et télécommunications dans ce qui suit nous allons mettre l'action sur les différentes notions concernant ces réseaux.

1.2.1 Définition d'un RCSF

Un réseau de capteurs sans (RCSF) fil est constitué d'un ensemble de nœuds situés dans un environnement donné pour une application précise (température, lecture de pression, contrôle, surveillance, détection d'intrusion, humidité d'air, agriculture, domotique, médecine, etc.). Les capteurs communiquent entre eux, transmettant des informations au nœud "sink" (puits), qui communique avec l'interface utilisateur.

Un RCSF ou en anglais WSN (Wireless Sensor Network) est donc constitué d'un grand nombre de capteurs autonomes capables de collecter et de coopérer pour transmettre des données environnementales. L'emplacement (positionnement) de ces nœuds n'est pas

nécessairement prédéterminé. Ils peuvent être répartis au hasard (aléatoirement) sur la zone géographique appelée zone de surveillance ou zone de détection [1], comme le montre la figure 1.1.

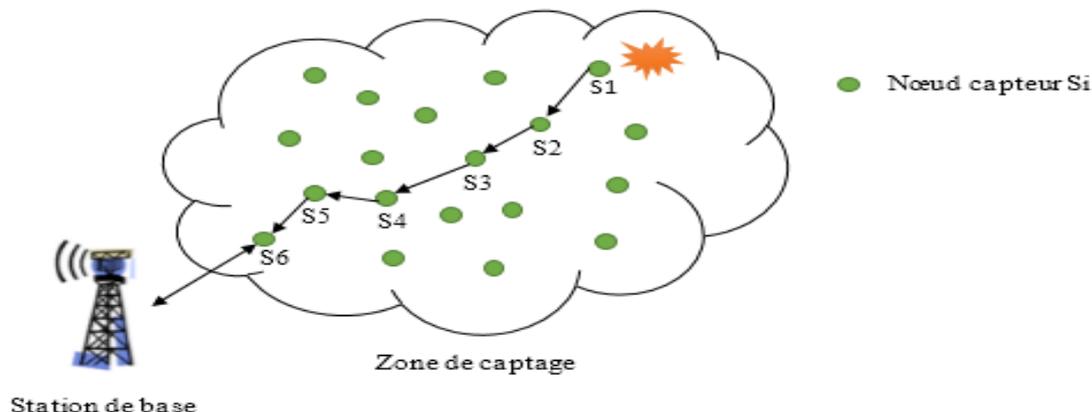


FIGURE 1.1 – Un réseau de capteur sans fil.

1.2.2 Architecture d'un réseau de capteur sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil sont construits autour des quatre principales entités suivantes [1] :

- **Capteur (Sensor)** : Comme son nom l'indique, il est chargé de mesurer les valeurs environnementales (température, pression, luminosité, présence, etc.).
- **Agrégateur (Aggregator)** : Responsable de l'agrégation des messages reçus de plusieurs capteurs, puis de leur envoi en un seul message au puits (sink). L'objectif principal de cette opération est de limiter le trafic sur le réseau alors prolonger ainsi la durée de vie globale du réseau de capteurs.
- **Puits (Sink)** : Toutes les valeurs mesurées par le réseau sont envoyées au puits qu'est le nœud final du réseau. Il peut arriver qu'il y ait plusieurs puits dans le même réseau de capteurs.
- **Passerelle (Gateway)** : la passerelle est un dispositif qui a la particularité d'avoir deux interfaces réseau. Il connecte les réseaux de capteurs sans fil à des réseaux plus traditionnels, typiquement l'Internet. En effet, généralement, le réseau de capteurs n'est utilisé que pour envoyer les mesures, les applications qui traitent ces informations s'exécutent sur la machine de l'utilisateur final.

Le fonctionnement global de cette architecture consiste donc en des capteurs effectuant des mesures qu'ils renvoient au puits via des agrégateurs. L'application finale fonctionnant sur une machine d'un autre réseau a donc accès aux valeurs via la passerelle. Notez que les agrégateurs sont facultatifs et que le puits et la passerelle sont généralement situés dans un seul périphérique [2]. La figure 1.2 illustre l'architecture d'un réseau de capteur sans fil.

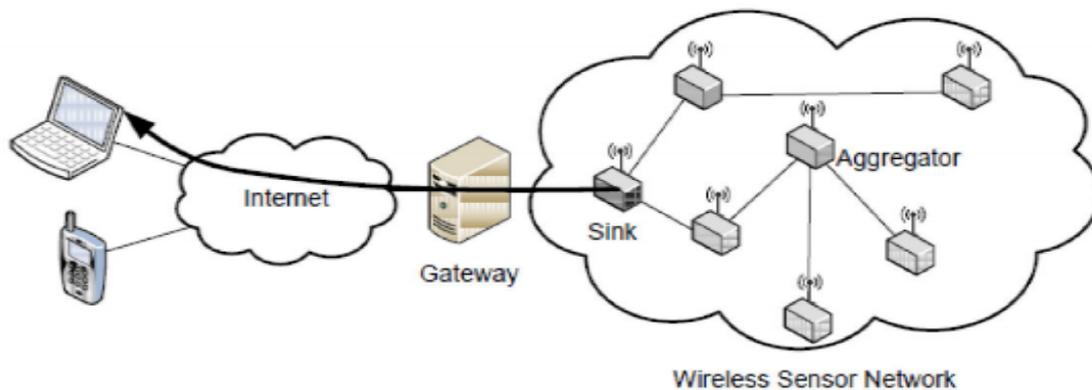


FIGURE 1.2 – Architecture d'un réseau de capteur sans fil.

1.2.3 Capteur sans fil

Les capteurs sont des appareils extrêmement petits avec des ressources limitée, autonome, capable de traiter l'information et de la transmettre via ondes radio vers une autre unité (capteurs, unité de traitement, etc.) à une distance limitée à quelques mètres [3]. La figure 1.3 qui suite représente un capteur.



FIGURE 1.3 – Un capteur sans fil

Le capteur comprend une architecture qui se base sur deux parties l'une est matérielle et l'autre est logiciel[4] :

Architecture matérielle :

L'architecture matérielle d'un capteur est composée sur quatre unités. La figure 1.4 ci-dessous montre l'architecture matérielle.

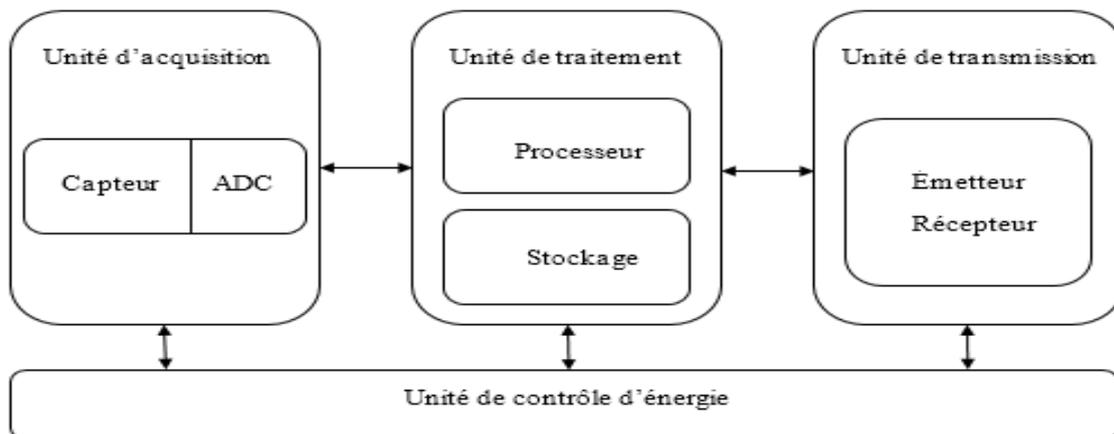


FIGURE 1.4 – Architecture d'un capteur

- **Unité d'acquisition** : elle se compose de deux sous-unités, d'un dispositif de détection physique qui récupère les informations de l'environnement local et d'un convertisseur analogique-numérique appelé ADC (convertisseurs analogique-numérique). Ce dernier convertit ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

- **Unité de traitement** : elle se compose de deux interfaces : l'une avec l'unité d'acquisition et l'autre avec le module de transmission. Elle contrôle les procédures permettant au nœud de coopérer avec d'autres nœuds afin de réaliser les tâches d'acquisition et de stockage des données collectées.
- **Unité de transmission** : Cette unité est responsable d'effectuer les transmissions et les réceptions de toutes les données sur le support de communication sans fil (radio, infrarouge, optique, etc.).
- **Unité de contrôle d'énergie** : Le capteur dispose d'une source d'énergie (batterie) pour alimenter tous ses éléments. Cependant. En conséquence de sa taille réduite, la ressource énergétique à sa disposition est limitée et généralement irremplaçable. Cette unité peut également gérer des systèmes de recharge d'énergie à partir de l'environnement observé, comme les cellules solaires, pour prolonger la durée de vie globale du réseau.

Architecture logicielle

Cette partie logicielle englobe principalement le système d'exploitation qui est utilisé dans ce genre d'appareille. Parmi ces système on trouve le TinyOS est un système d'exploitation open-source spécialement conçu pour les réseaux de capteurs sans fil, développé par l'université américaine de Berkeley. Sa conception a été entièrement réalisée en NesC, langage orienté composant proche du C, et la bibliothèque de composants de TinyOS est particulièrement complète puisqu'on y retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données [5] [6]. Ce système est le plus répondu dans le domaine des RCSF. Il existe plusieurs autres systèmes d'exploitation développés pour les réseaux de capteurs sans fil principalement Contiki, MantiOS et LiteOS.

1.2.4 Type des capteurs sans fil

Il existe plusieurs types de capteurs sans fil, entre autre, on peut citer quelque exemple selon [7] :

- **Transmetteurs** : les transmetteurs utilisent des capteurs spécifiques pour mesurer les propriétés du processus, puis transmettent les données au récepteur via des signaux radio. La figure 1.5 montre un transmetteur.



FIGURE 1.5 – Transmetteur.

- **Récepteurs** : les récepteurs reçoivent et interprètent les données sans fil. Le récepteur lit le signal radio et le convertit en résultat souhaité ; certains récepteurs peuvent même exporter les données vers des logiciels avancés. La figure 1.6 présente un récepteur.

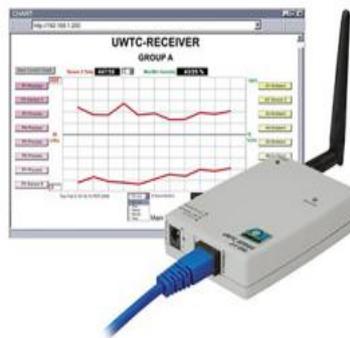


FIGURE 1.6 – Récepteurs.

- **Régulateurs** : Les régulateurs fonctionnent de la même manière que le récepteur, ils reçoivent et analysent les données des émetteurs sans fil. Cependant, les régulateurs sans fil sont également capables de manipuler le processus en fonction des données mesurées. La figure 1.7 présente un régulateur.



FIGURE 1.7 – Récepteurs.

- **Enregistreurs de données** : sont un type particulier de réseaux de mesure sans fil car ils offrent à l'utilisateur final une nouvelle dimension de flexibilité. Ils peuvent surveiller à distance la température n'importe où, puis envoyer les données à l'ingénieur après avoir renvoyé le lecteur au récepteur. La figure 1.8 illustre un Enregistreur de données.



FIGURE 1.8 – Enregistreurs de données.

- **Emetteurs-récepteurs** : les émetteurs-récepteurs contiennent un émetteur et un récepteur dans une seule unité. Grâce à la possibilité de retransmettre les signaux, ils sont en mesure d'étendre la portée des réseaux de mesure sans fil. La figure 1.9 présente un Emetteur-récepteur.



FIGURE 1.9 – Émetteurs-récepteurs.

1.2.5 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil

Les RCSF sont souvent caractérisés par un déploiement dense et à grande échelle dans des environnements distants, dangereux et inaccessibles. Nous citons quelques caractéristiques de ces réseaux :

- **Durée de vie limitée** : Les RCSF sont destinés à collecter des informations dans des environnements hostiles auxquels les humains n'ont pas toujours accès. Par conséquent, une fois le déploiement, les capteurs sont autonomes (en général, leurs batteries ne peuvent être ni rechargeables ni remplaçables). et donc, leur durée de vie dépend de la durée de vie de leurs batteries [8].
- **Ressources limitées** : Les capteurs sont des objets communicants limités en termes de bande passante (débit de transmission), de puissance de calcul, de mémoire disponible et d'énergie embarquée.
- **Communication ()tous-vers-un** : (many-to-one), dans ce modèle de trafic chaque capteur peut recevoir des informations de plusieurs nœuds, c'est le plus courant dans les RCSF [9].
- **Absence d'infrastructure** : Les réseaux de capteurs sans fil occupent des zones conçues indépendamment de toute infrastructure comme tous les réseaux ad hoc [10].
- **Connectivité** : La plupart des RCSF sont très denses. Cependant, le déploiement, la mobilité et les pannes modifient la topologie d'un réseau dont la connectivité n'est pas toujours garantie [11].

1.3 Contraintes de conception d'un réseau

Plusieurs paramètres influencent la conception et la construction des réseaux de capteurs sans fil. Ces facteurs servent de lignes directrices pour le développement des algorithmes et des protocoles utilisés au RCSF.

- **La tolérance aux fautes** : La tolérance aux fautes est la capacité de maintenir la fonctionnalité du réseau en cas de panne [12].
- **Facteur d'échelle (Scalabilité)** : Un si grand nombre de nœuds générera un grand nombre de transmissions entre nœuds et peut entraîner des difficultés dans le transfert de données[13].
- **Coûts de production** : Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un grand nombre de nœuds, donc le prix des nœuds est crucial pour concurrencer les réseaux de surveillance traditionnels [14].
- **Environnement** : Les capteurs sont généralement largement utilisés sur les champs de bataille, à l'intérieur de grandes machines et au fond de la mer. Par conséquent, ils doivent pouvoir rester sans surveillance dans des zones géographiques éloignées[12].
- **Topologie de réseau** : En raison de leur mobilité possible et des pannes que certains nœuds peuvent provoquer, la topologie du réseau de capteurs peut changer de manière aléatoire et imprévisible[13] [14]
- **Contraintes matérielles** : La principale contrainte matérielle est la taille du capteur. D'autres contraintes sont la consommation d'énergie, qui doit être moindre pour que le réseau dure le plus longtemps possible, qui s'adapte à différents environnements (température élevée, eau, etc.) et qu'il soit autonome et très résilient car il est souvent déployé dans des environnements hostiles.
- **Médias de transmission** : Dans le réseau de capteurs, les nœuds sont connectés via une architecture sans fil. Pour fonctionner sur ces réseaux dans le monde entier, les supports de transmission doivent être normalisés. Les plus couramment utilisés sont la communication radio infrarouge, Bluetooth et Zig Bee [15].

1.4 Consommation d'énergie :

Le capteur a une énergie limitée en raison de sa taille. Dans la plupart des cas, la batterie ne peut pas être remplacée. Cela signifie que la durée de vie du capteur dépend direc-

tement de la durée de vie de la batterie. Chaque nœud dans le réseau de capteurs (multi-saut) collecte des données et envoie / transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de plusieurs nœuds nécessite la modification de la topologie du réseau et le réacheminement des paquets. Toutes ces opérations étant gourmandes en énergie, les recherches actuelles se sont principalement concentrées sur les moyens de réduire cette consommation [12].

1.5 Domaine d'application des RCSFs

Les RCSFs peuvent être constitués d'une large gamme de types de capteurs capables de surveiller une variété de paramètres, tels que, la température, l'humidité, la pression, le mouvement des véhicules, le niveau de bruit, la présence ou l'absence d'objets, etc... , ce qui permet aux ce genre de réseaux d'occuper rapidement plusieurs domaines d'application (voir la figure 1.10) parmi des domaines nous citons[16] :

- Domaine militaire,
- Domaine médicale,
- Domaine environnemental,
- Domaine d'agriculture de précision,
- Domaine industriel.



FIGURE 1.10 – Les domaines d'application dans les RCSF

1.6 Communication dans les RCSF

1.6.1 Pile protocolaire

Un réseau de capteur généralement est relié avec d'autres types de réseaux. Afin de pouvoir communiquer, une interface de communication standard est nécessaire. L'architecture de communication dans les réseaux de capteurs est conçue en couches comme les réseaux filaires (voir la figure 1.11), dans chaque couche à ses rôles et à ses protocoles qui fonctionnent en dessus. Étant donné que l'objectif d'un réseau de capteurs n'est pas la communication elle-même et que la consommation d'énergie est un critère très important, D'autres unités doivent exister pour gérer la consommation d'énergie, la mobilité des nœuds et la planification des tâches, comme indiqué dans la figure ci-dessous [17] :

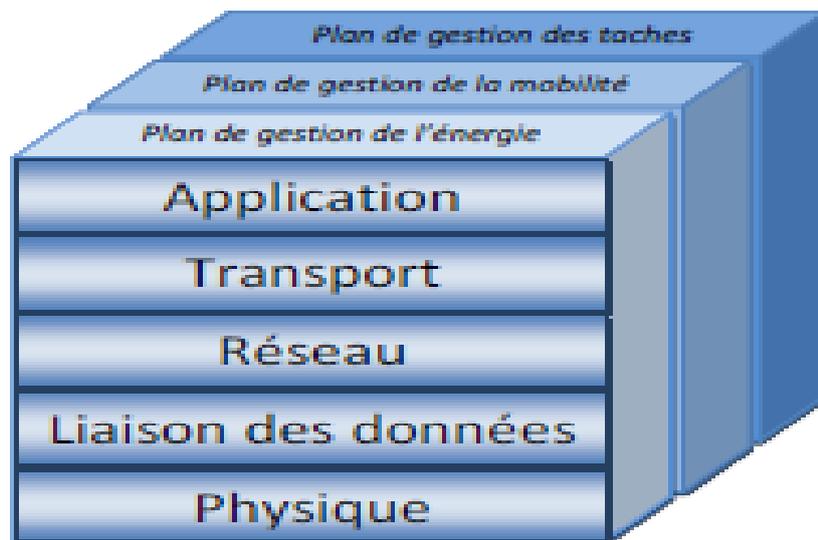


FIGURE 1.11 – pile protocolaire

Couches

- **Couche physique (Physical Layer)** : Fournit une technologie puissante de transmission, de réception et de modulation.
- **Couche liaison de données (Data Link Layer)** : Les fonctions de la couche liaison de données comprennent le contrôle d'accès au support (MAC) et le contrôle des erreurs. Étant donné que l'environnement du réseau de capteurs est bruyant et que les nœuds peuvent se déplacer, la couche liaison de données doit garantir une

consommation d'énergie réduite et un taux de collision minimum entre les données diffusées par les nœuds adjacents.

- **Couche réseau (Network Layer)** : Responsable de routage des données fournies par la couche transport.
- **Couche transport (Transport Layer)** : Cette couche est chargée de transmettre les données, de les décomposer en paquets de données, de contrôler le flux, de maintenir l'ordre des paquets et de gérer les erreurs de transmission.
- **Couche application (Application Layer)** : La couche application constitue un ensemble d'applications implémentées sur le réseau de capteurs. Ces applications doivent fournir aux utilisateurs des mécanismes d'interaction avec le réseau de capteurs via diverses interfaces, et éventuellement, via un réseau étendu (comme Internet). C'est donc le niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels.

Niveaux (plans) de gestion

Les différents niveaux de gestion sont [5] :

- **Niveau de gestion d'énergie** : Responsable du contrôle de la façon dont le nœud utilise son énergie.
- **Niveau de gestion des tâches** : équilibre la division des tâches sur les différents nœuds afin d'effectuer un travail conjoint.
- **Niveau de gestion de la mobilité** : détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds de capteur.

1.7 Conclusion

Les réseaux de capteur sans fil sont des réseaux sans fil décentralisés basés sur la notion d'un grand nombre des nœuds. Dans ce chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteur sans fil et les concepts généraux liés à ce type de réseau à savoir la définition et l'architecture d'un nœud capteur et d'un réseau de capteurs sans fil. Dans le chapitre suivant nous allons présenter les différentes techniques de routage avec un plan méthodologique

Routage dans les réseaux de capteur sans fil

2.1 Introduction

Les applications RCSF se diversifient de plus en plus. Cependant, plusieurs problèmes restent à résoudre avant que ces réseaux puissent faire de leur mieux. Ces problèmes incluent des problèmes de routage. En effet, le nœud doit acheminer ses données vers la station de base tout en minimisant la consommation d'énergie et de garantir une bonne livraison des données. Donc, la conception de protocoles prenant en compte la consommation d'énergie devient cruciale pour établir un RCSF durable.

Le routage est un mécanisme qui peut être défini comme un ensemble d'opérations permettant de garantir la transmission des données qui sont transmises entre le nœud, fournissant les données et le nœud cible via un réseau de connexion donné. Par conséquent, un bon routage doit pouvoir transmettre ces informations. Alors, sans routage, la communication sur n'importe quel réseau serait impossible.

Ce chapitre présente les principaux protocoles de routage RCSF qui peuvent être utilisés dans notre proposition. Par conséquent, pour garantir une bonne politique d'acheminement, les éléments suivants [18] [19] doivent être pris en compte :

- Contraintes énergétiques : toutes les couches doivent tenir compte de la limitation d'énergie des capteurs dans le but de pouvoir optimiser la durée de vie du réseau ;
- Bande passante limitée ;
- Absence d'adressage global ;
- Redondance des données ;
- Réseau à sources multiples et destination unique ;

- Gestion des ressources ;
- Capacités de stockage limitées ;
- Capacités de calcul limitées.

2.2 Collecte d'informations dans les RCSF

Il existe deux méthodes dans un réseau de capteurs sans fil pour collecter les informations.

2.2.1 Collecte d'informations à la demande

Dans cette méthode, on veut avoir l'état de la zone de couverture à un certain moment. Le puits envoie des broadcasts à toute la zone pour que les capteurs donnent des informations et les envoient vers le puits via une communication multi-sauts. La figure 2.1 illustre ce mode de communication.

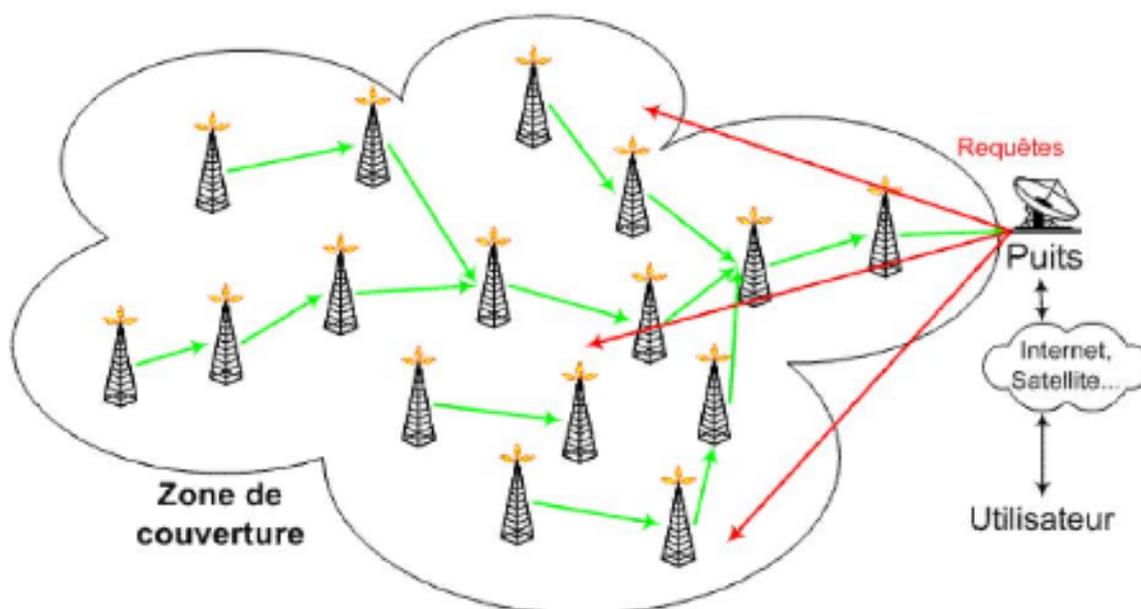


FIGURE 2.1 – Collecte d'informations à la demande.

[20]

2.2.2 Collecte d'informations suite à un événement

Cette méthode suit un événement qui se produit à un moment donné dans la zone de détection. Ensuite, les capteurs entourant l'événement détecté accèdent aux informations

collectées et les envoient au puits. La figure 2.2 symbolise comment se fait la communication de l'information dans ce mode.

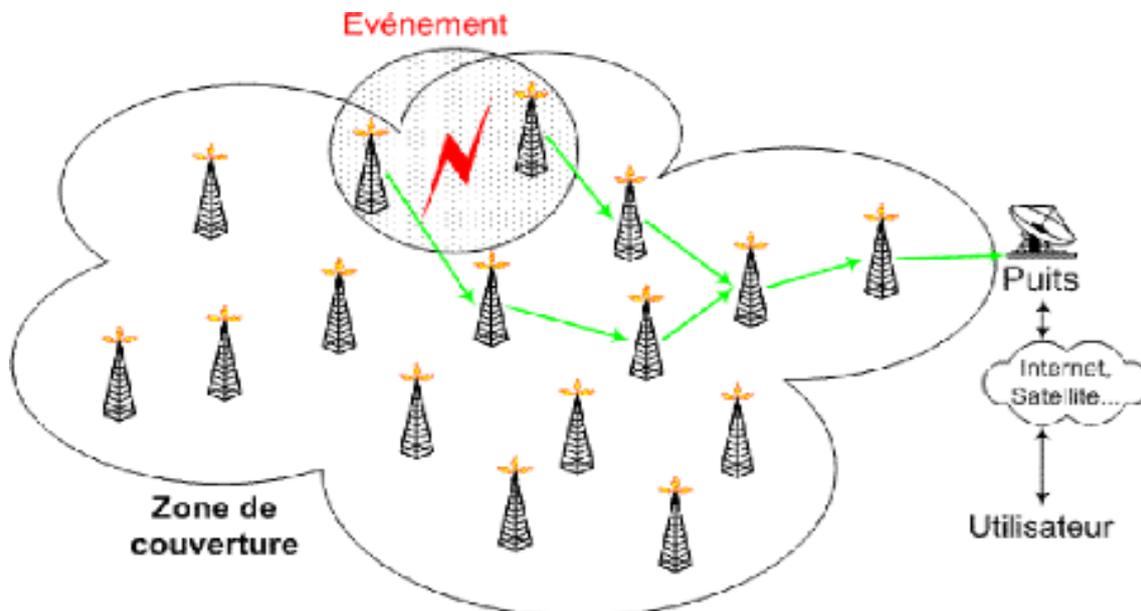


FIGURE 2.2 – Collection orientée événement

[20]

2.3 Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont généralement déployés de manière dense dans un champ de puits à proximité ou à l'intérieur du phénomène capturé, Chaque nœud communique directement avec son voisin, et pour communiquer avec un autre nœud, il doit passer des données via d'autres nœuds qui se chargeront de l'acheminement. Pour cette raison, il est important que les nœuds soient positionnés les uns par rapport aux autres et puissent créer des liens entre eux. Afin de permettre la communication dans le réseau déployé, des protocoles de routage spéciaux basés sur une communication multi-sauts sont nécessaires. Le but de chaque protocole est différent selon la philosophie d'approche à laquelle il appartient, ils peuvent être classés selon plusieurs critères. La Figure 2.3 illustre une classification qui se base sur trois critères : la topologie du réseau, fonction du protocole, l'établissement de la route.

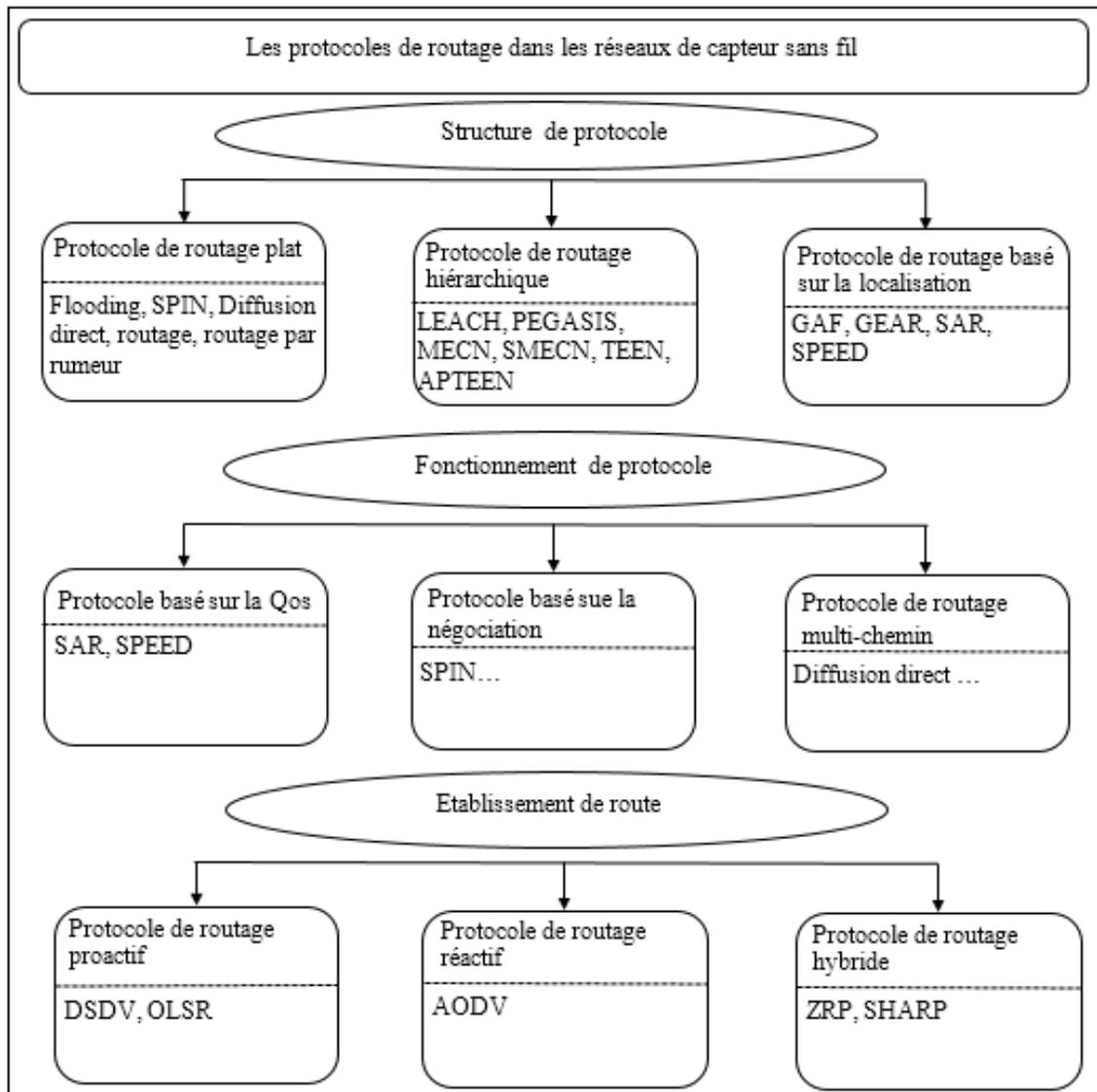


FIGURE 2.3 – Classification des protocoles de routage.

2.3.1 Classification selon la structure de réseau

La topologie détermine l'organisation des capteurs dans le réseau et joue un rôle significatif dans le fonctionnement du protocole de routage. Globalement il existe trois topologies dans les RCSFs : la topologie plate, la topologie hiérarchique et la topologie géographique.

Protocoles de routage à plat

Dans une topologie plat [2], tous les nœuds de capteur ont le même rôle de coopère dans la tâche de routage. Compte tenu du grand nombre de nœuds utilisés, il est presque impossible d'attribuer un identifiant à chaque nœud. Dans ce cas, le routage linéaire est

utilisé lorsque la station de base lance une requête vers la région et attend des données provenant de nœuds dans la région sélectionnée.

Les réseaux plats se caractérisent par : la simplicité des protocoles de routage, des coûts de maintenance réduits, une tolérance aux pannes élevée, ainsi que la possibilité de créer de nouveaux chemins après des changements de topologie. Cependant, les nœuds proches du puits sont plus impliqués dans le routage que d'autres. De plus, ces réseaux ont une faible scalabilité dû au fonctionnement identique des nœuds et de manière distribuée, ce qui nécessite un grand nombre de messages de contrôle[16]. On peut donner un exemple

- **le protocole Flooding** Dans le protocole Flooding [21] (également appelé l'inondation), chaque nœud reçoit des messages sous la forme d'un paquet de données puis les diffuse sur le réseau. Ainsi, ce protocole repose sur la transmission de tous les nouveaux paquets reçus et non destinés à lui. Ce protocole n'a pas besoin de maintenir une table de routage ou de découvrir son voisinage et de maintenir une topologie spécifique. En revanche, ce protocole présente deux inconvénients majeurs qui sont le problème de duplication de paquets (problème d'implosion) et le problème d'overlap. En effet, le problème d'implosion est illustré à la figure 2.4. Deux nœuds B et C reçoivent le même paquet de données du nœud A, puis les mêmes nœuds transmettront le même paquet au nœud D, d'où ce dernier recevra deux copies du même paquet. Ainsi, on ne peut plus faire la distinction entre les paquets récents et les anciens paquets.

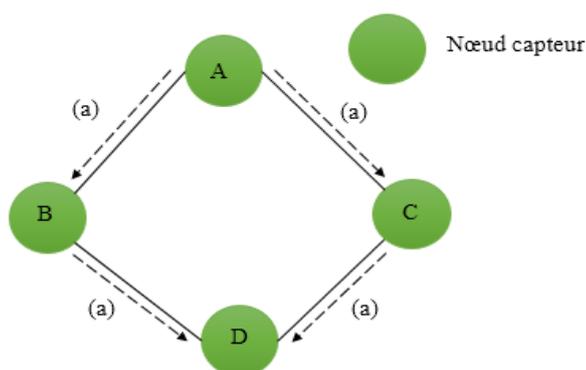


FIGURE 2.4 – problème d'implosion.

D'autre part, Lorsque deux nœuds observent la même zone et diffusent ensuite les mêmes informations à d'autres nœuds, le problème d'overlap se produit. C'est illustré à la figure 2.5

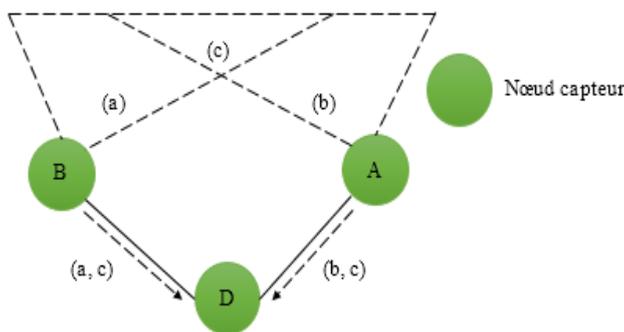


FIGURE 2.5 – problème d’overlap.

La faiblesse de ce protocole est qu’il est ”aveugle” en termes de consommation d’énergie. En effet, ce protocole permet un flux de données élevées et une consommation importante en termes d’énergie, réduisant ainsi considérablement sa durée de vie.

Protocoles de routages hiérarchiques

Dans le routage hiérarchique [16], il existe certaines méthodes pour atteindre plusieurs niveaux de communication, mais le rôle des nœuds de capteurs est différent. Cette technique repose sur la division des capteurs du réseau en clusters (groupes de nœuds), et chaque cluster consiste un chef (cluster-head). Le chef peut être sélectionné à son tour ou en fonction du nombre de voisins. La méthode consiste à considérer le nœud avec le plus grand voisin comme cluster-head ou à sélectionner le chef en fonction du niveau d’énergie restante. L’ensemble des cluster-head est appelé l’ensemble dominant, tandis que les nœuds qui ne sont pas qualifiés appelés nœuds ordinaire. Afin d’économiser de l’énergie dans le réseau, des nœuds à une énergie importante sont utilisés pour traiter et agréger les données et les envoyer à la destination finale (sink), Les nœuds bas énergie sont utilisés pour effectuer des tâches de capture. Le principal avantage de ce routage est d’éliminer la redondance des données. En effet, pour réduire le nombre de messages envoyés à la destination chaque cluster-head agrège des données. Cependant, l’inconvénient est que les cluster-head utilisent plus d’énergie que les autres nœuds du réseau. S’ils ne changent pas régulièrement, le réseau sera partitionné.

- **Le protocole LEACH** :Le protocole LEACH est l’une des premières approches de routage hiérarchique pour les RCSF. C’est un protocole repose dans leur archi-

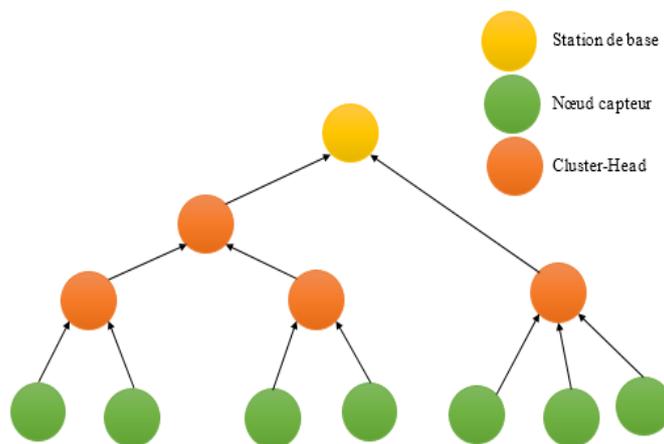


FIGURE 2.6 – Technique hiérarchique.

ture sur des (clusters) ou grappes implémentés pour les RCSF qui partitionne les nœuds en clusters. Il est également considéré comme la base des autres protocoles de routage de cluster. L'idée proposée dans LEACH a été une source d'inspiration pour de nombreux protocoles de routage hiérarchique, bien que certains protocoles aient été développés indépendamment [16]. Dans chaque cluster, un nœud dédié avec des privilèges supplémentaires, appelé Cluster Head (CH) est responsable de la création et de la manipulation TDMA (accès multiple par répartition en temps) et envoi des données agrégées des nœuds à la station de base où ces données sont nécessaires en utilisant CDMA (accès multiple par répartition en code). Les nœuds restants sont des membres de cluster. Ce protocole hiérarchique les plus populaires pour les réseaux de capteurs. L'idée est de construire des clusters de nœuds capteurs en se basant sur la puissance du signal reçu et prendre comme routeur vers le puits, le cluster-head local. Cela économisera de l'énergie puisque seul les cluster-head effectueront une transmission vers le puits. Le nombre optimal de cluster-head dans un réseau de capteurs est de 5% par rapport au nombre total de nœuds. Tous les processus de données tel que la fusion et l'agrégation sont locaux au cluster. Le cluster-head est élu périodiquement en fonction de son niveau d'énergie pour équilibrer la consommation d'énergie des nœuds. Le cluster-head est élu durant une période de temps appelé round. Les nœuds choisissent un nombre réel entre 0 et 1. Le nœud devient le cluster head dans ce round si le nombre est inférieur au seuil suivant [22] :

$$T(n) = \begin{cases} P/(1 - P * (r \bmod 1/p)) & \text{si } n \text{ n'appartient pas à } G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Où P est le pourcentage désiré de cluster-head

- r : est le round en cour.
- n : est l'ensemble des nœud qui n'ont pas été cluster-head dans les derniers $(1/P)$ rounds.
- G : est l'ensemble des nœuds du cluster.

LEACH apporte un facteur de sept dans la réduction de la consommation d'énergie comparé à Directed Diffusion et un facteur de quatre à huit comparé au protocole de routage sensible à l'énergie (Energy Awar Protocol) [23]. Le clustering dynamique augmente la durée de vie du réseau.

LEACH est totalement distribué et n'a besoin d'aucune connaissance globale du réseau. Cependant LEACH utilise un routage à saut unique où chaque nœud peut transmettre directement au cluster-head et au puits. Mais il n'est pas applicable aux réseaux qui sont déployés sur une grande surface. De plus, le clustering dynamique ajoute une grande surcharge comme le changement des cluster-head ce qui peut diminuer le gain en énergie [23].

Parmi les avantages de ce protocole [22], la consommation d'énergie est partagée sur l'ensemble des nœuds prolongeant ainsi la durée de vie du réseau, et chaque nœud transmet des données dans son slot (tranche de temps), donc le taux de collision est diminué. Aussi, lorsqu'un nœud n'est pas dans son slot, il éteint sa radio pour conserver son énergie donc prolonger sa durée de vie.

Par contre LEACH sélectionne au hasard le chef de groupe à chaque tour. Donc, l'énergie de certains nœuds peut s'épuiser trop rapidement en raison de la sélection de chef de cluster chaque fois, et les clusters heads peuvent se concentrer dans un même endroit, par conséquent, il pourrait exister des nœuds isolés (sans cluster head) pouvant se déclarer, ainsi que l'agrégation des données dans LEACH est centralisée et est exécutée périodiquement. Or, dans certains cas, la transmission

périodique des données pourrait ne pas être nécessaire, ce qui épuise rapidement l'énergie limitée des capteurs. Après l'agrégation de données, le chef de groupe envoie ses données directement à la station de base, qui peuvent être éloignées et consomme plus d'énergie éventuellement.

Protocoles basé sur la localisation géographique

La majorité des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs nécessitent la position (localisation) des nœuds de capteurs. La localisation des nœuds peut être disponible en communiquant avec un satellite, utilisant un système GPS (Global Positioning System). En règle générale, ces informations sont nécessaires pour calculer la distance entre deux nœuds individuels afin de pouvoir estimer la consommation d'énergie. À cause de l'absence de système d'adressage pour les nœuds sans réseaux de capteurs (tels que les adresses IP) et parce qu'ils sont déployés de manière aléatoire dans une région. si on connaît à priori l'emplacement des nœuds capteurs on peut les utiliser dans le routage des informations afin de minimiser la consommation d'énergie et de maximiser ainsi la durée de vie du réseau [16]. Ces protocoles éliminent les transmissions inutiles en envoyant des demandes de la station de base à une zone spécifique, minimisant donc la consommation d'énergie. Par contre, il nécessite une administration centralisée pour le calcul des positions des nœuds et souffre du manque de précision des récepteurs GPS, ainsi que de la forte consommation d'énergie. Les protocoles suivants : GAF, MFR, SPEED, TSRP sont des exemples de protocoles de cette couche [24].

- **Le GAF** GAF (Geographic Adaptive Fidelity) est un algorithme de routage basé sur la localisation qui prend en compte la consommation d'énergie, conçu principalement pour les réseaux mobiles ad hoc, mais peut être utilisé dans les réseaux de capteurs. Économise de l'énergie en mettant en veille les nœuds inutiles du réseau sans affecter le niveau de précision du routage. Crée une grille virtuelle pour la zone couverte [22]. Chaque nœud utilise sa position GPS pour s'associer à un point de la grille virtuelle. Les nœuds connectés au même point du réseau sont considérés comme équivalents en termes de coûts de routage. Cette équivalence est exploitée en maintenant plusieurs nœuds d'un secteur donné de la grille dans l'état de sommeil afin d'économiser de l'énergie [25]. Un exemple sur GAF est illustré dans la figure 2.7. Le nœud 1 peut atteindre les nœuds 2, 3 et 4, ces derniers peuvent

atteindre le nœud 5. Par conséquent, les nœuds 2, 3 et 4 sont équivalents et deux d'entre eux peuvent dormir.

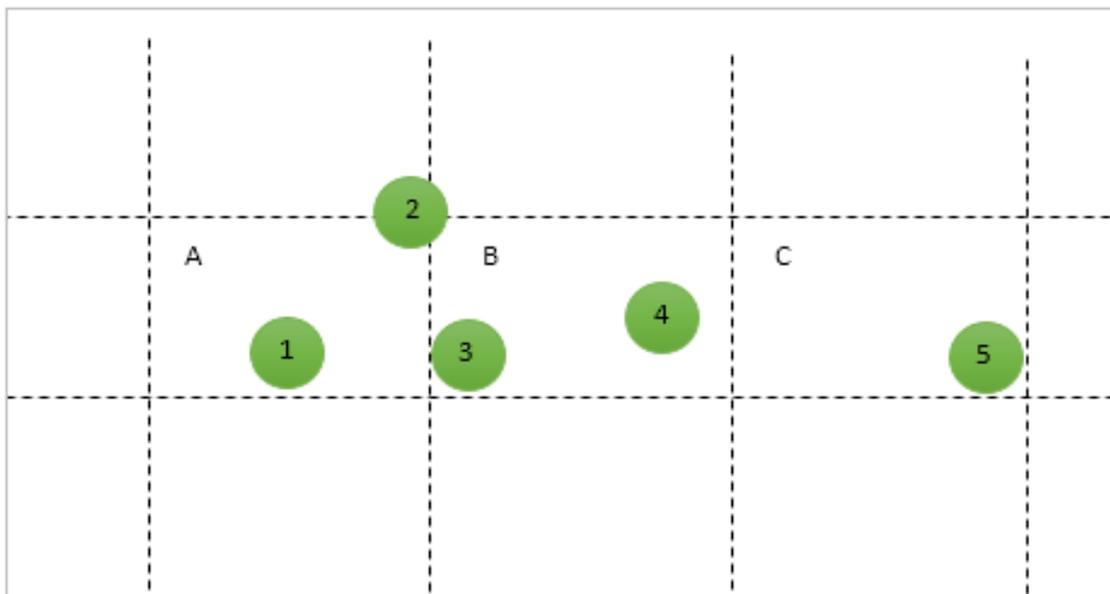


FIGURE 2.7 – exemple sur le GAF.

Les nœuds change d'états de dormir à actif par tour de sorte que la charge est équilibrée. Il y a trois états définis dans GAF. Ces états sont : l'état de découverte : pour la détermination des voisins dans la grille, l'état actif : reflétant la participation dans le routage et l'état de sommeil : quand la radio est éteinte [26].

2.3.2 Classification selon le fonctionnement de protocole

Le fonctionnement du protocole de routage dans le réseau de capteurs peut être utilisé comme facteur de classification car le mode de fonctionnement définit la manière dont les données sont propagées dans le réseau. Selon ce critère, les protocoles de routage peuvent être divisés en trois catégories : routage basé sur la Qualité de service (Quality of Service) " QoS ", routage basé sur les multi-chemins (Multi-path routing), et routage basé sur la négociation (Negociation based routing) [16].

Routage basé sur la Qualité de Service

Dans les protocoles de routage basés sur QoS, le réseau doit équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité de données. En particulier, le réseau doit satisfaire certaines métriques de QoS, par exemple, retard, énergie, largeur de bande passante, etc. En effet,

ces protocoles doivent considérer la qualité de service comme une métrique additionnelle à satisfaire dans les décisions des routages [21].

Les protocoles de routage basés sur la QoS sont utilisés dans les applications qui ont des exigences temps-réel. Par exemple, dans le domaine de la sécurité, la détection d'intrusion doit être acheminée au plus bref délai vers le nœud puits. Ce type de protocoles essaye de répondre à quelques exigences de qualité de service (délais de transmission ou niveau de fiabilité) et doit faire l'équilibre avec la consommation d'énergie [2].

L'avantage principale est la prise des délais de transmission rend les protocoles de cette approche très recommandés à des applications de surveillances centre nucléaire, applications militaires, ... etc. ainsi que le taux d'arrivé des paquets aux nœuds est plus élevé. Par contre l'énergie consommé est trop importante ce qu'il faut prend en considération la contrainte d'énergie en parallèle avec les critères de la Qos. Parmi les protocoles de ce type on peut citer comme exemple :

- **Le protocole SPEED** Le protocole SPEED [27] est classé parmi les protocoles de routage géographique, basé sur la qualité de service. Sa caractéristique fondamentale est la garantie d'un délai de livraison de bout en bout optimale. Avec cette spécification, SPEED est le protocole le plus approprié pour des applications temps réel des réseaux de capteurs [27]. En effet, ce protocole essaye de garantir une vitesse de transmission des paquets constante dans tout le réseau. Pour garantir un routage de qualité de service en temps réel, SPEED utilise la collaboration de plusieurs modules, comme l'illustre la figure 2.8.

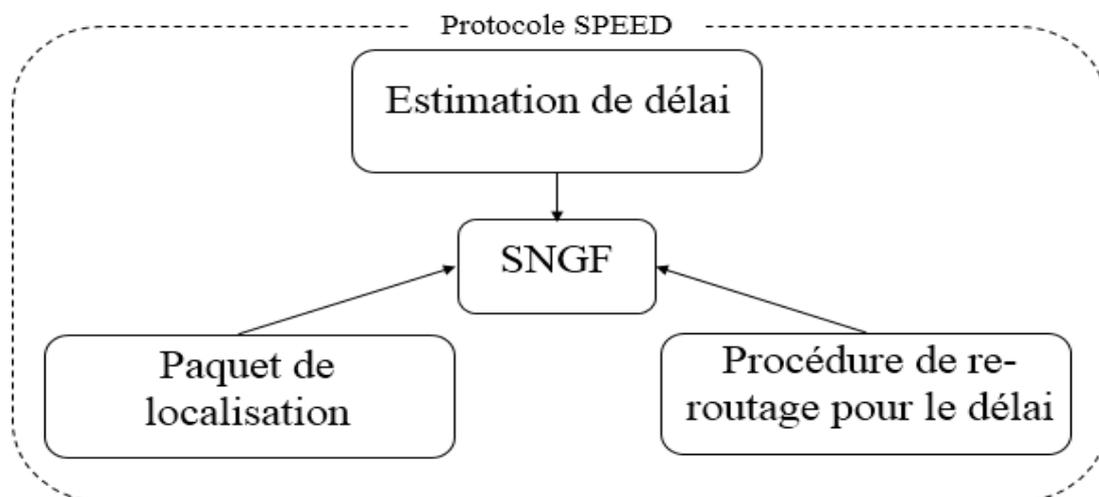


FIGURE 2.8 – Architecture fonctionnelle du protocole SPEED

Les modules mis en évidence par l'architecture fonctionnelle de SPEED opèrent de la façon suivante :

Module Paquet de localisation (Beacon Exchange) : permet la localisation géographique des nœuds. Dans ce module les nœuds, exécutant le protocole SPEED, diffusent périodiquement des paquets de localisation pour tenir à jour les changements de la topologie du réseau. Les nœuds récepteurs interprètent les informations reçues et les sauvegardent pour construire leurs tables de voisinage. Ces paquets ont le format suivant [26] :



FIGURE 2.9 – Paquet de localisation

- Le champ ID Voisin identifie le voisin émetteur de ce paquet de localisation.
- Le champ Position contient la position géographique du nœud émetteur du paquet. - Le champ Délai d'Envoi est le délai estimé pour atteindre le nœud destination identifié par Global.ID.
- Le champ Temps d'Expiration est un (timer) désignant la validité de l'information transportée, c'est-à-dire, à son expiration, le nœud supprimera ces informations de sa table de voisinage.

Le nombre de paquets de localisation échangé devient de moins en moins important si les nœuds se déplacent lentement ou sont fixes.

Le module Estimation du délai (Delay Estimation) est le mécanisme permettant la prédiction du délai nécessaire pour la transmission des paquets vers le prochain saut. Ce mécanisme utilisé par le protocole SPEED, joue un rôle très déterminant dans la maintenance et la garantie de la livraison des paquets dans les délais exigés. Les réseaux de capteurs disposent généralement d'une bande passante limitée [27], ce qui rend difficile l'utilisation des paquets de signalisation propre à l'estimation des délais de livraison. Pour cela, l'exploitation des paquets DATA, passant par un nœud capteur, s'avère la meilleure solution pour ce genre de mesure.

Estimation du délai intermédiaire L'estimation du délai se fait au niveau du nœud émetteur. Celui-ci enregistre instantanément le temps de départ du dernier bit du paquet DATA, noté $(t_{ij_{depart}})$, et calcule le temps mis pour effectuer un seul saut quand il reçoit l'acquittement de son paquet envoyé. A son arrivée au nœud j , ce dernier acquitte la réception du paquet DATA en indiquant le temps écoulé du traitement du paquet ACK, noté $(t_{ij_{ACK}})$ Ainsi, le nœud émetteur enregistre le temps d'arrivé du paquet ACK, noté $(t_{ij_{arrive}})$ et mesure le temps mis pour effectuer un seul saut suivant la formule suivante :

$$t_{ij_{saut}} = t_{ij_{arrive}} - t_{ij_{ACK}} - t_{ij_{depart}}$$

L'estimation du délai courant est donnée en combinant cette nouvelle valeur calculée avec les délais antérieurs suivant la méthode EWMA (Exponential Weighted Moving Average) [28].

SNGF (Stateless Non-deterministic Geographic Forwarding) est le module de routage, responsable de la sélection du prochain saut offrant la vitesse de livraison des paquets souhaitée. **Calcul de la vitesse de livraison :** L'exemple suivant explique la méthode de calcul de la vitesse de livraison entre deux nœuds voisins [26] :

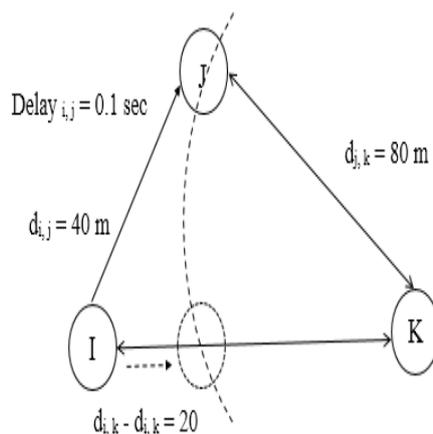


FIGURE 2.10 – Calcule vitesse de livraison.

Nous considérons deux nœuds voisins i et j (figure 2.10). Les distances leurs séparant de la destination k sont respectivement $d_{i,k} = 100\text{m}$ et $d_{j,k} = 80\text{m}$. Si le nœud i transmet ses paquets vers le nœud j dans un délai $\text{delay}_{i,j} = 0.1$ seconde, ce qui permet de s'approcher de la destination d'une distance d égale à $(d_{i,k} - dd_{j,k}) =$

à la portée du nœud F et qui sont susceptibles d'être sélectionnés pour continuer la transmission des données vers le nœud destination. Le champ FSF groupe les nœuds de prochain saut qui sont plus proche à la destination que le nœud F et qui offre une vitesse de livraison supérieure ou égale à la vitesse de seuil Setspeed. Ceci est exprimé par [27] :

$$FS_F = \{ \text{nœud } j \in NS_F / d_{F,D} - d_{j,D} > 0 \text{ et vitesse de livraison} \geq \text{Setspeed} \}$$

Avec

NS_F : (Neighbors Set) nœuds voisins du nœud F,

$d_{F,D}$: la distance séparant le nœud F du nœud destination d,

$d_{j,D}$: distance séparant le nœud j de prochain saut du nœud destination.

B. Le nœud du prochain saut devra être choisi parmi le premier groupe et disposant de la vitesse de transmission la plus importante.

C. Dans le cas où la zone FSF est dépourvue des nœuds, autrement dit, si le nœud F échoue de trouver un prochain saut, il rejette alors le paquet en question et envoie des paquets Back pressure aux nœuds précédents pour leur interdire momentanément la transmission des paquets vers sa région.

La Procédure de re-routage pour délai (Back pressure Rerouting) est appelée si un cas de congestion du nœud de prochain saut est rencontré.

Format du paquet « Delay Back pressure » Le paquet « Delay Back pressure » comporte les champs suivants :

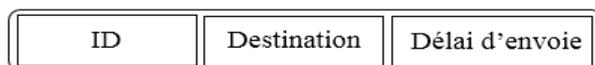


FIGURE 2.12 – Paquet « Delay Back pressure ».

- le champ ID contient l'identité du nœud émettant le paquet « Delay Back pressure ».
- le champ Destination contient l'identité du nœud destination.
- le champ Délai d'Envoi contient la durée de livraison estimée entre les deux nœuds ID et Destination.

Cette durée est le délai intermédiaire nécessaire ($\text{delayID, Destination}$) pour effectuer le saut entre ces deux derniers. Ce champ prend la valeur infinie (∞), si le nœud ID ne trouve aucun nœud voisin pour lui envoyer le paquet DATA.

Procédure de re-routage en cas de congestion Le protocole SPEED utilise une procédure de re-routage appelée « Back pressure rerouting », si au cours de route, on rencontre des nœuds congestionnés. L'exemple illustré par les figures 2.13 (a, b, c, d), décrit clairement la procédure de re-routage [26] :

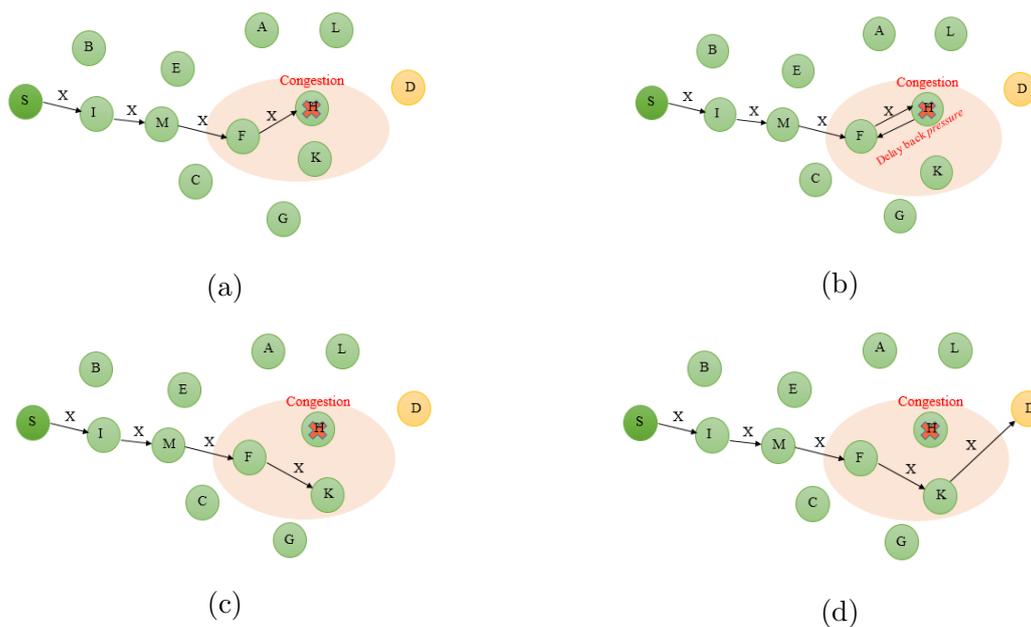


FIGURE 2.13 – Procédure de re-routage pour délai « Delay back pressure rerouting » (cas 1)

Le nœud S désire transmettre un paquet DATA, noté X, jusqu'à la destination D. En arrivant au nœud F, celui-ci choisit comme prochain saut le nœud H (le choix du nœud est effectué par le module SNGF). Mais il se trouve que ce nœud est congestionné, alors il répond le nœud F par un paquet « Delay back pressure » pour lui informer qu'il ne peut pas délivrer le paquet X dans un délai favorable vu son état de congestion. Le nœud F active, alors, son module SNGF pour re-sélectionner un autre nœud appartenant à l'ensemble FSF (Forwarding Set pour le nœud F), et il finit par re-router le paquet X au nœud K.

Un deuxième cas peut se présenter si tous les nœuds de l'ensemble FSF est en état de congestion. Ce cas de figure est illustré par les figures 2.14 (a,b,c,d,e) :

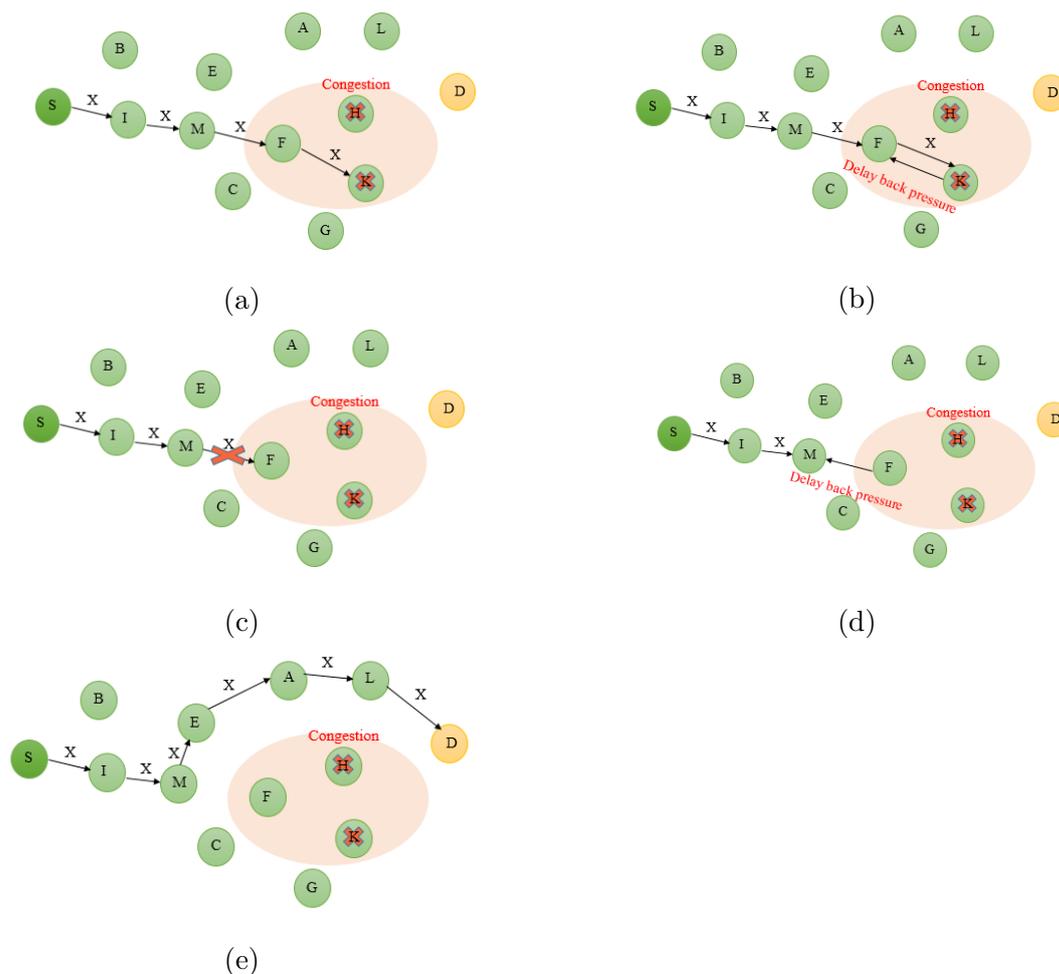


FIGURE 2.14 – Procédure de re-routage pour délai « Delay back pressure rerouting » (cas 2)

Reprenant les étapes précédentes (a), (b), (c) et (d) de la figure 2.13 Supposant qu'à l'étape (d), le nœud F trouve, aussi, le nœud K en état de congestion. Ce dernier va lui envoyer, alors, le paquet « Delay back pressure ». Supposant maintenant que F ne trouve aucun autre nœud susceptible d'être celui du prochain saut. Ce nœud F supprime, alors, le paquet DATA et envoie au nœud M un paquet « Delay back pressure » lui indiquant qu'il a échoué de transmettre ce paquet X. Dans ce cas, le nœud M active son SNGF pour sélectionner un autre prochain saut (dans notre exemple, le nœud E est choisi. De même, si le nœud M trouve tous ses voisins, appartenant à son champ FSM, congestionnés, il réagit de la même façon que le nœud F et le nœud I devra alors acheminer les paquets vers un autre nœud.

Void avoidance Un troisième cas peut se présenter si l'ensemble des nœuds de prochains sauts FSF est vide. Le protocole SPEED sait résoudre ce genre de problème en se basant sur la notion de Void Avoidance illustré par les figures 2.15. (a,b,c) :

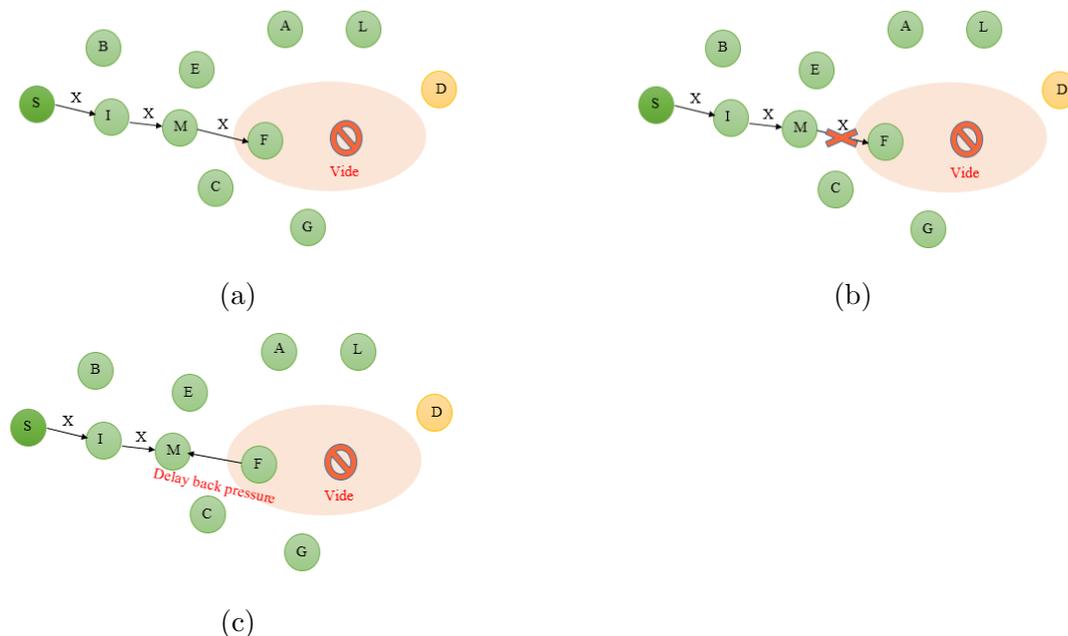


FIGURE 2.15 – Mécanisme de Void avoidance.

D'après le scénario de ces figures, le nœud F ne trouve aucun nœud voisin qui mène vers la destination D, par conséquent, il supprime le paquet DATA et envoie le paquet «Delay Back pressure », contenant les champs suivants (ID, DESTINATION, ∞), vers le nœud du saut précédent. À son tour, le nœud M affecte la valeur ∞ au champ (SendToDelay) pour dire que le choix du nœud F, comme un intermédiaire, nécessite un délai de transmission très important, donc il ne va plus être sélectionné comme un prochain saut vers la destination finale et le nœud M se trouve obligé de choisir un prochain saut différent.

— Le protocole de la couche MAC

Le protocole SPEED utilise le protocole DCF (Distributed Coordination Function) pour le routage des paquets au niveau de la couche MAC [29]. DCF (Distributed Coordination Function) qui est une variante améliorée de la méthode d'accès CSMA/CA. Celle-ci permet d'éviter les collisions lors de la transmission par ralentissement aléatoire après chaque trame (backoff).

Limites du protocole SPEED SPEED a été développé pour prendre en charge la

communication en temps réel. Cependant, l'utilisation de ce protocole dans des réseaux de capteurs denses et à grande échelle augmente le nombre total de paquets de contrôle générés, ce qui entraîne- La surcharge du réseau avec ces paquets de contrôle. - Diminution de la durée de vie du réseau à cause de l'augmentation de l'énergie consommée pour l'envoi et la réception de ces paquets de contrôle.- L'encombrement du réseau par ces paquets de contrôle fait augmenter le nombre des nœuds congestionnés ce qui produit des retards dans la livraison des données à cause de l'utilisation de la procédure de re-routage.

Routage basé sur les multi-chemins Cette catégorie repose sur les protocoles de routage qui utilisent des chemins multiples au lieu qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau. La fiabilité d'un protocole peut être mesurée par sa capacité à trouver des chemins alternatifs entre la source et la destination en cas de défaillance du chemin primaire. Pour cette raison, certains protocoles construisent plusieurs chemins indépendants, c-a-d. : ils ne partagent qu'un nombre réduit (voire nul) de nœuds. Malgré l'augmentation de la fiabilité et la robustesse du réseau par l'existence de chemins multiples. Mais ils provoquent la perte additionnelle d'énergie due à l'envoi des messages périodiques pour maintenir les chemins alternatifs. Aussi, l'utilisation des chemins ayant des nœuds communs qui peuvent tomber en panne augmente le risque de perte des paquets. Nous pouvons citer comme avantage qu'un mécanisme d'équilibre de charge peut être utilisé pour la répartition du trafic sur les routes, ce qui permet de répartir l'utilisation des ressources des intermédiaires (énergie) et le débit sur les liens, et que la fiabilité et la robustesse par la possibilité d'existence de plusieurs routes entre la source et la destination est augmentée. Ce qui impose une consommation énormément d'énergie à cause d'utilisation de plusieurs chemins pour les maintenir actifs, et un risque de perte de paquets augmente dans le cas où ces derniers ont été envoyés sur des chemins ayant des nœuds communs qui peuvent tomber en panne. On peut citer comme exemple :

- **Le protocole « Directed Diffusion »** Directed diffusion est un protocole réactif qui est simple dans son principe, permet d'utiliser plusieurs chemins pour le routage des informations. Son principe de fonctionnement est le suivant : Le nœud «sink» commence à envoyer, vers tous les nœuds, un message (Interest) pour démarrer une application bien déterminée. Ce paquet sera acquitté par un autre appelé (gradient). Un gradient est un lien de réponse de la part du voisin recevant l'intérêt. En utilisant les intérêts et les gradients [30], plusieurs chemins peuvent

être établis entre le « sink » et la source. L'un de ces chemins est sélectionné par renforcement. Si ce chemin échoue, un nouveau ou un alternatif doit être identifié, puisque les données sont demandées par des requêtes. En outre, cette méthode est coûteuse en termes de consommation d'énergie et ne représente pas un bon modèle pour RCSF. La Figure 2.16 suivante illustre les phases de fonctionnement de ce protocole. Sachant que : (a) propagation de l'intérêt. (b) construction des gradients initiaux (c) livraison des données par renforcement.

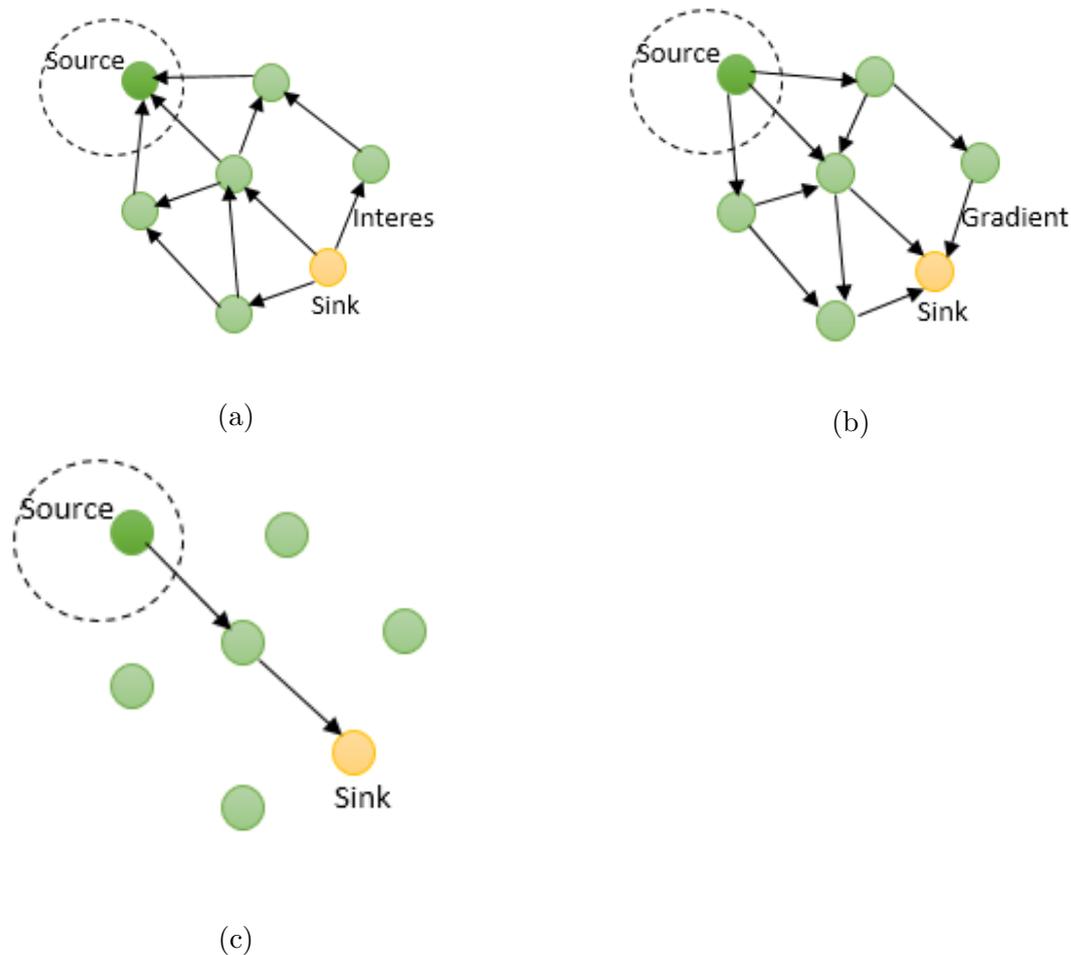


FIGURE 2.16 – Phases de communication du protocole Directed Diffusion.

Routage basée sur la négociation Ce type de protocole est basé sur la suppression des données redondantes. L'objectif principale de cette approche c'est que [31] : avant de transmettre, les capteurs négocient entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation spéciales, appelés métadonnées. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent des mêmes données à transmettre. Cette procédure garantit la transmission des données utiles et élimine la redondance, mais elle risque une perte

d'énergie dans le réseau causée par l'envoi des métadonnées, et aussi une longue durée de scénario de négociation cause une délivrance retardée des données. On peut donner comme exemple :

- **Le protocole SPIN** La famille de protocole SPIN est un bon exemple illustratif du routage basé sur la négociation. L'idée derrière le SPIN est de nommer les données en utilisant des descripteurs de haut niveau ou des métas données. Avant la transmission, les métadonnées sont échangées entre les capteurs par un mécanisme de publicité de données. Chaque nœud recevant de nouvelles données, l'annonce à ses voisins et ceux intéressés récupèrent les données en envoyant une requête (voir la figure 2.17). Le protocole SPIN suit les étapes suivantes :
 - Le nœud A lance ses données au nœud B (a).
 - B répond par une requête (b).
 - B reçoit les données requises (c).
 - B fait de la publicité à ses voisins (d) qui répondent par des requêtes (e-f).

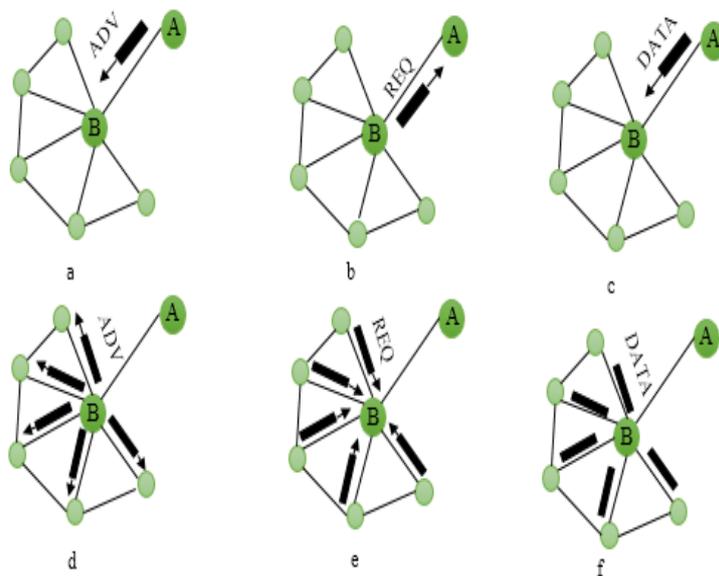


FIGURE 2.17 – le protocole SPIN.

Fonctionnement de SPIN Les communications dans SPIN se font en trois étapes :

- Lorsqu'un nœud veut émettre une donnée, il émet d'abord un message ADV contenant une description de la donnée en question.
- Un nœud recevant un message ADV, consulte sa base d'intérêt. S'il est intéressé

par cette information, il émet un message REQ vers son voisin.

- En recevant un message REQ, l'émetteur transmet à l'intéressé la donnée sous forme d'un message DATA.

2.3.3 classification selon l'établissement de route

Pendant le routage cette classe suit la manière de création et de maintien des chemins, nous distinguons trois catégories de protocoles de routage : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides [32].

Dans les protocoles proactifs, les chemins sont calculés à l'avance, alors que dans les protocoles réactifs les chemins sont calculés à la demande. Les protocoles hybrides emploient une combinaison de ces deux idées (Voir la figure 2.18).

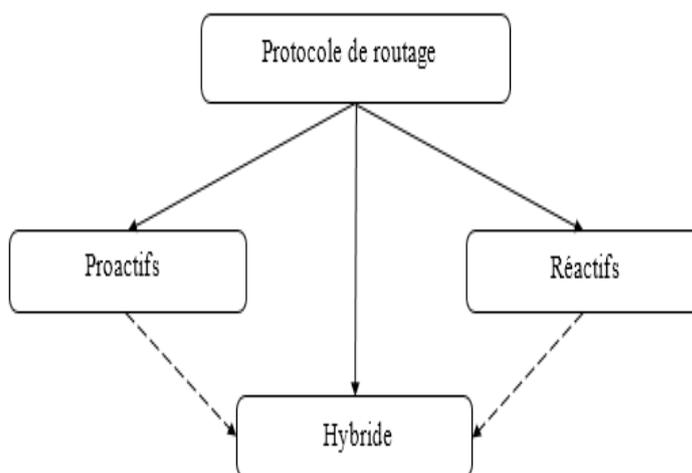


FIGURE 2.18 – Classification selon établissement de route

Protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs sont également appelés protocoles de routage pilotés par table. Les routes sont établies à l'avance, en se basant sur l'échange périodique des tables de routage. En effet, dans ce type de routage chaque nœud de réseau cherche à établir des tables de routage valides en permanence, afin de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles [33].

Les protocoles proactifs ne conviennent pas aux grands réseaux, car ils doivent maintenir les entrées de chaque nœud dans la table de routage. Ces protocoles conservent un

nombre différent de tables de routage variant d'un protocole à un autre.

Ces protocoles reposent sur la disponibilité immédiate de la route lors du besoin « gain de temps » et la facilité d'acheminement des données, mais le problème est que les routes sont stockées même si elles ne sont pas utilisées. Il existe différents protocoles de routage proactifs bien connus. (Ex :DSDV, OLSR, WRP ... etc.) .

— **DSDV (Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing Protocol)**

DSDV est un protocole proactif unicast mobile ad hoc qui est basé sur l'algorithme de Bellman-Ford [34], où chaque nœud maintient une table qui contient la plus courte distance et le plus court chemin à tous les autres nœuds dans le réseau.

Dans les tables de routage de DSDV on trouve :

- Toutes les destinations possibles,
- Le nombre de nœuds (ou de sauts) nécessaire pour atteindre la destination,
- Le numéro de séquences (SN : sequence number) qui correspond à un nœud destination,
- Les numéros de séquence sont utilisés dans DSDV pour distinguer les anciennes et nouvelles routes et pour éviter aussi la formation de boucles de parcours. Chaque nœud transmet périodiquement des mises à jour, y compris des informations de routage à ses voisins immédiats [31].

Ce protocole repose sur les mises à jour sont propagées dans tout le réseau afin de maintenir une vue à jour sur la topologie du réseau à tous les nœuds. En effet, ce protocole peut être appliqué aux MANET avec peu de modifications. Mais DSDV souffre d'un contrôle excessif frais généraux qui est proportionnel au nombre de nœuds dans le réseau et n'est donc pas évolutif dans les MANET, qui sont limités en terme de bande passante et dont les topologies sont très dynamiques. En revanche Afin d'obtenir des informations sur un nœud particulier de destination, un nœud doit attendre la table de mise à jour de message initiée par le même nœud destination. Ce retard pourrait entraîner un routage d'information périmé aux nœuds [16].

Protocoles réactifs

Dits aussi protocoles de routage à la demande. Contrairement au routage proactif, les protocoles de routage réactifs déterminent les routes au moment où une transmission

doit être réalisée. Pour cela, le routage se fait en deux étapes [35] : la première sert à la recherche du chemin et la seconde consiste au transfert de données. Ces protocoles offrent une meilleure conservation d'énergie par rapport aux protocoles proactifs, mais le problème qui se pose est le délai significatif engendré par l'établissement des routes pour pouvoir émettre des paquets sans la connaissance des routes au préalable et aussi, il est impossible de connaître préalablement la qualité des chemins en termes de bande passante, délais de transmission . . . etc. Parmi les protocoles de ce type On peut citer comme exemple :

- **AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector)** AODV [36] est un protocole de routage réactif qui crée un chemin vers la destination quand il en a besoin. Les routes ne sont pas construites avant que certains nœuds ont l'intention de communiquer ou de transmettre des données entre eux.

Ce protocole stocke une seule entrée de routage par destination. Avec ce scénario, il faudra réduire les frais généraux de mémoire, les ressources réseau minimum utilisées, et le bon fonctionnement dans situation de haute mobilité. Il ne supporte pas les multi-chemins. Bien que cela réduise la surcharge à chaque nœud.

Chaque nœud dans AODV a une table de routage qui contient les informations de ses voisins, lorsque un nœud veut transmettre des données vers la station émettrice, il envoie une requête Route Request (RREQ) (voir figure 2.19), chaque nœud reçoit la requête RREQ met à jour sa table de routage. Il ajoute une nouvelle route valide vers le nœud émetteur dans le but d'atteindre la source de requête RREQ. Après l'arrivée de requête RREQ à la destination, cette dernière envoie une requête RREP (Route Reply) et la renvoyer à la source (voir figure 2.20). Chaque nœud possède un numéro de séquence qui permet de choisir la route la plus récente et de maintenir la consistance des informations de routage [31].

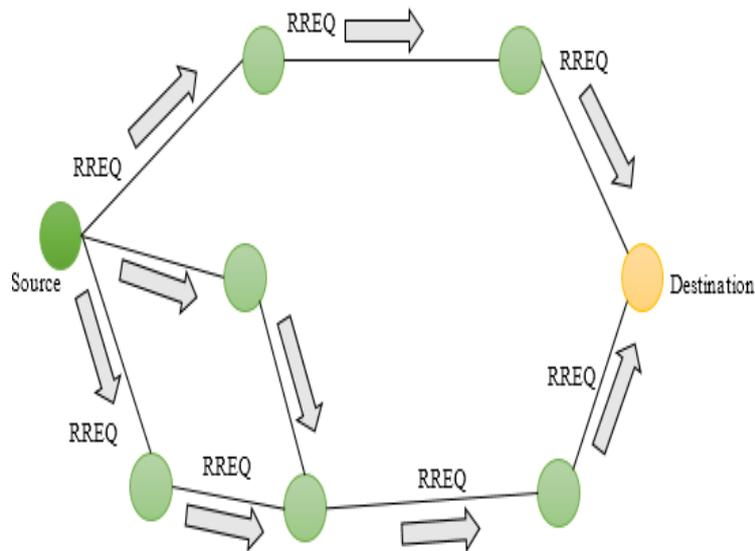


FIGURE 2.19 – la propagation de requête RREQ.

Protocoles hybrides Ce type de protocoles tire avantage des méthodes réactives et proactives, et limite leurs inconvénients. Ces protocoles appliquent la politique proactive à l'intérieur de la zone de voisinage par exemple le voisinage à deux ou à trois sauts) ; au-delà de cette dernière, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher les routes. Le protocole hybride convient aux grands réseaux où un grand nombre de nœuds sont présents. Ce grand réseau est divisé en un ensemble de zones où le routage à l'intérieur de la zone est effectué en utilisant l'approche réactive et en dehors de la zone, le routage est fait en utilisant l'approche réactive. Il y a divers populaires protocoles de routage hybrides comme ZRP [37], SHARP (Hybrid Adaptive Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks) [38].

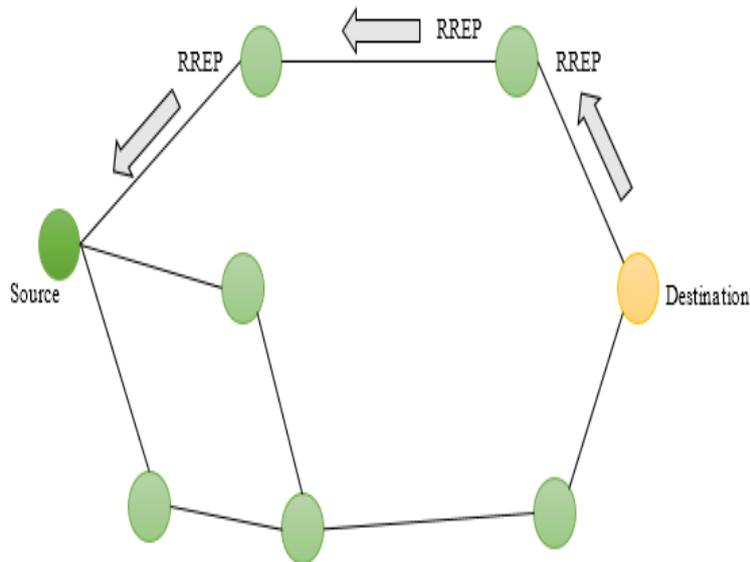


FIGURE 2.20 – le chemin pris par RREP.

2.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes classes de classification dans le routage citons quelques protocoles déployés dans les réseaux de capteurs. Nous avons constaté que ces protocoles ont tous un objectif commun qui consiste à assurer une bonne livraison des données collectées par les nœuds capteurs tout en essayant de minimiser la consommation d'énergie pour augmenter la durée de vie du réseau, ce qui nous a inspirés pour mettre en œuvre une nouvelle proposition dans le routage de réseaux de capteur sans fil. Ceci constitue l'objet de chapitre suivant.

Speed basé sur basse consommation d'énergie (Speed Based on Low Energy Consumption)

3.1 Introduction

Les applications à base de réseaux de capteurs demandent à ces dispositifs de leur fournir des données fiables et exploitables pour satisfaire les besoins des utilisateurs. Il faut programmer les capteurs de telle sorte de pouvoir générer des données pertinentes. Pour arriver à ce but, il faudra faire face aux différentes contraintes que connaît ce genre de réseaux notamment en terme de support de la qualité de service en particulier la tolérance aux pannes et de consommation d'énergie. Tel que l'énergie est l'un des principaux axes de recherche dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), souvent que l'énergie des capteurs est limitée et généralement étant très difficile de les changer. Après avoir étudié les techniques de routage dans les réseaux de capteurs sans fil, dans ce chapitre nous nous intéressons à proposer un nouveau protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil qui basé sur l'amélioration de la qualité de service en minimisant la consommation d'énergie de réseau.

3.2 Le protocole proposé

Le routage est l'une des problématiques les plus fondamentales dans un RCSF. Pour cela plusieurs algorithmes et protocoles de routage en été proposés afin de faire parvenir les données capturées à la station de base, en empruntant les chemins induisent une bonne

qualité de service, et parmi ces protocoles nous trouvons le protocole SPEED qui est un protocole efficace en termes de Qos.

Dans cette section on va représenter notre contribution qui consiste un nouveau protocole de routage à basse consommation d'énergie pour les RCSFs. il porte une combinaison entre la Qos et la minimisation de la consommation d'énergie.

Le protocole SPEED [27] est conçu pour fournir des garanties temps-réel de bout-en-bout pour les paquets dans les réseaux de capteurs sans avoir une connaissance globale sur la topologie du réseau. Cependant l'utilisation de ce protocole dans les réseaux de capteurs dense à grand échelle influe sur les performances du protocole ainsi que sur la durée de vie du réseau. Alors il faudra minimiser la consommation d'énergie pour maximiser la durée de vie du réseau.

Cette proposition repose sur le mécanisme des protocoles qui basés sur la localisation géographique, tel que nous intéressons de diviser le réseau en k-zones et chaque zone contient un chef de zone.

Le problème de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil est devenu un axe de recherche très important et d'actualité ces dernières années. Ceci a motivé un grand nombre de chercheurs à proposer des protocoles à économie l'énergie dans la perspective de maximiser la durée de vie du réseau. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de se baser sur les différents critères concernant les CZs (Chefs des zones) tel que l'énergie résiduelle, la distance qui sépare le CZ de la SB, et la distance moyenne qui sépare le CZ avec les nœuds de même zone.

Dans les réseaux de capteurs sans fil, les protocoles basés sur la localisation géographique permettant de deviser le réseau à des zones dont chacune est dominée par un chef de zone (CZ). Ces CZs sont souvent nécessaires pour l'organisation des activités dans les zones, leurs tâche ne se limite pas à l'agrégation de données, elle s'étend aussi à l'organisation de la communication intra-zone par un seul saut et même inter-zone par multi-sauts. Notre protocole se base sur le routage géographique. Il découpe le réseau en plusieurs zones afin d'assurer le routage multi-sauts entre les nœuds du réseau et la SB (le routage multi-sauts permet de minimiser la consommation d'énergie), en suite le protocole permet à chaque zone de choisir un chef de zone, prendre en considération certaines critères pour sélectionner les chefs des zone (CZs).

Ce nouveau protocole est divisé en plusieurs phase comme se suite

3.2.1 Hypothèse

Pour une meilleure illustration de notre protocole, nous allons supposer certaines hypothèses en se basant sur le modèle du réseau suivant :

- Les nœuds capteurs sont tous identiques (même énergie initiale, même capacité de stockage et de traitement de données),
- Les nœuds sont distribués aléatoirement sur la zone de capture.
- Les nœuds sont fixes, pas de mobilité,
- La mort de chaque capteur n'est causée que par l'épuisement de son énergie, pas d'autres causes de défaillances,
- La portée d'un nœud est supposée identique pour tous les nœuds du réseau,
- La station de base est vue comme une ressource non limitée ni épuisable,
- La station de base connaît les informations de chaque nœud,
- Chaque nœud possède un identifiant unique ID-nœud,
- Chaque nœud a un identifiant de zone ID-zone,
- Chaque nœud possède ID de Chef de zone,
- La station de base est capable d'envoyer des signaux unidirectionnels.

3.2.2 Principe de fonctionnement

Dans les réseaux de capteurs sans fil non industriels chaque capteur alimenté par une batterie non rechargeable ni remplaçable, pour cela, chaque capteur doit gérer ses ressources énergétiques d'une manière optimale pour prolonger sa durée de vie, ce qui engendre la maximisation de durée de vie globale du réseau. Notre protocole de routage est dédié aux RCSFs pour cet objectif.

En effet, le fonctionnement de notre protocole est établi en plusieurs phases principales qui sont :

Après la phase de division d réseau en k -zones, la phase ce qui suite est la sélection des CZs d'où, ces derniers sont désignés par les métriques : énergie résiduelle du nœud, énergie résiduelle de ces voisins, énergie résiduelle de tous les nœuds de même zone, la distance qui sépare le nœud et la station de base, la distance entre le nœud et ses voisins. La deuxième phase est le routage des données vers la station de base, où tous les nœuds (ordinaires ou CZs) utilisent des algorithmes spécifiques pour acheminer l'information jusqu'à l'arrivée à la SB.

Ces différentes phases seront détaillées dans ce qui suit :

Phase de division de réseau et de sélection des chefs des zones (CZs)

La phase de sélection des CZs par la SB (sélection centralisée) est divisée en deux étapes principales. La première étape est caractérisée par la division du réseau en zones, la seconde est l'élection un chef pour chaque zone selon certains métriques. A la fin de cette phase, notre réseau sera divisé en plusieurs zones, et chacune possède leur propres CZs.

Nous allons former une grille virtuelle sur le réseau de capteurs (comme il est représenté dans la figure 3.1), où chaque nœud emploie sa position indiquée par le module de localisation (tel que GPS) pour s'associer à un point dans la grille virtuelle.

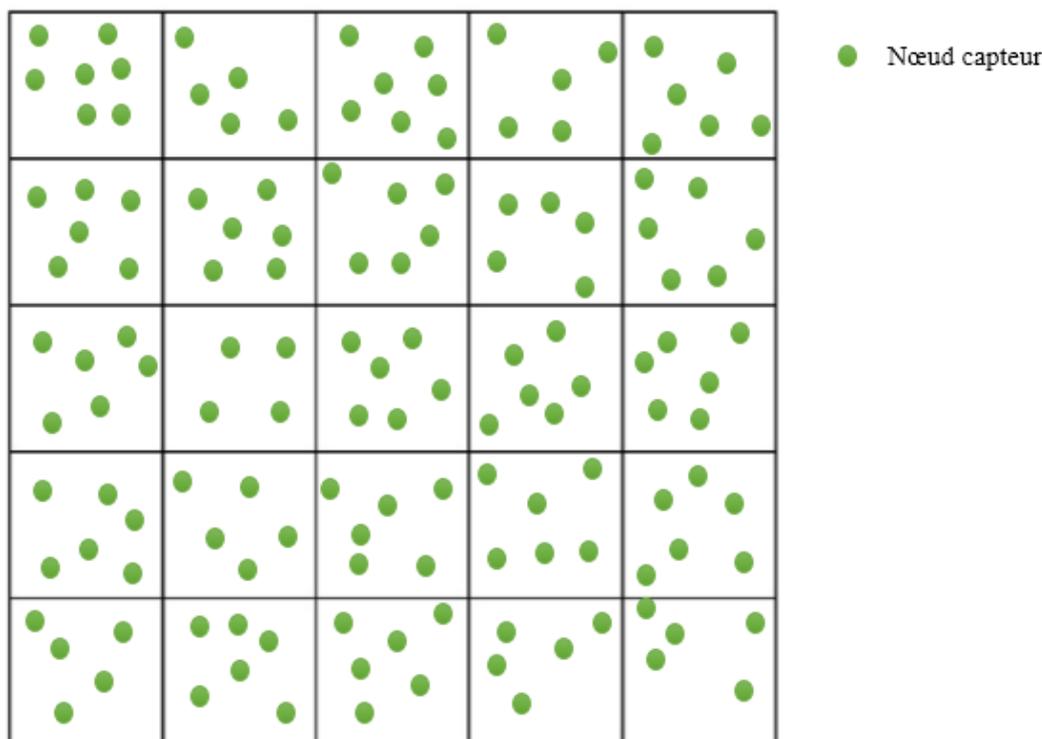


FIGURE 3.1 – Formation des zones.

Sélection des chefs des zones Après la formation des zones, Les nœuds capteurs qui se situent dans la même zone (possèdent le même identifiant ID_zone) communiquent entre eux et la station de base pour sélectionner les CZs. En effet chaque nœud n calcule la probabilité de devenir un CZ puis il l'envoie vers la SB, et cette dernière sélectionne les CZs de chaque zone selon un algorithme spécial. La métrique que nous avons utilisée pour faire l'élection des CZs est une combinaison de l'énergie du nœud, la distance.

Elle est calculée par la formule 3.1.

$$P_{CZ} = \left(\frac{Er}{E_{zone} * E_{voisins}} \right) + \left(\frac{\beta}{Dist_n} \right) \quad (3.1)$$

Où :

P_{CZ} : la probabilité d'un nœud n de devenir un CZ.

Er : L'énergie résiduelle du nœud n.

E_{zone} : l'énergie résiduelle de tous les nœuds de même zone que le nœud n.

$E_{voisins}$: l'énergie résiduelle des voisins du nœud n.

$Dist_{SB_n}$: représente la distance qui sépare le nœud n de la SB.

β : Paramètres qui dépendent de l'application (β c'est un paramètre empirique). La valeur choisie de ce paramètre, adaptée pour notre application seront justifiée par simulation. En effet on à ajouter ce paramètre pour diminuer l'impact du la distance dans le résultat final de probabilité qu'un nœud devient un CZ (le grande impacte liée à l'énergie).

Analyse de la métrique choisie Chaque zone à un chef de zone élu selon la valeur de sa probabilité qui est une combinaison de l'énergie, et de la distance.

- **Paramètre énergie** : l'énergie est un paramètre incontournable à prendre en considération dans toute manipulation des réseaux de capteurs sans fil. Ce paramètre est utilisé afin d'augmenter la durée de vie du réseau. En effet grâce à la formule (3.1), un nœud qui possède une énergie résiduelle très faible a moins de chance de devenir un chef de zone même s'il possède une petite distance par rapport à la station de base
- **Paramètre distance** : la distance utilisée dans la formule (3.1) est pour choisir les nœuds les plus proches à la station de base comme des CZs, et prendre aussi en considérations la position de nœud par rapport à ses voisins (on va donc choisir le nœud ayant la distance minimale par rapport à ses voisins).

Après les calculs des probabilités, chaque nœud envoie sa probabilité de devenir un chef de zone (CZ) et la liste des voisins à la station de base pour sélectionner les CZs de chaque zone. Ensuite, la SB se base sur la règle suivante :” Si un nœud possède la plus haute probabilité dans son voisinage, il se déclare comme étant chef de zone”, et met les probabilités de leurs voisins à 0 (pour prévenir les voisins de devenir des CZs) Si les probabilités de deux nœuds ou plus sont égales, la station de base choisit celui qui

a l'identificateur le plus petit entre eux. L'algorithme suivant présente la formation des zones et la sélection des CZs :

Déclaration :

X : variable sur largeur W pour effectuer une largeur à chaque zone.

Y : variable sur la hauteur H pour effectuer une hauteur à chaque zone.

W : largeur de notre zone que nous souhaite à diviser.

H : hauteur de notre zone que nous souhaite à diviser.

s : nombre de zones sur la hauteur.

X_n, Y_n : sont les coordonnées correspondent à chaque nœud.

Sni : un nœud capteur.

SB : la station de base.

Z : le nombre de zones dans le réseau.

Er : énergie résiduelle du nœud Sni.

l, K : compteur.

ID_zone : variable pour stocker le numéro de niveau pour chaque Sni. **n(l)** : variable pour stocker le nombre de nœuds de chaque zone.

Tab1[l] : tableau d'entiers qui stocke le nombre de nœuds dans chaque case pour chaque zone.

Tab3[K] : tableau d'entier qui stocke les probabilités des nœuds de devenir des CZs.

Liste : liste contenant les CZs. β : constante //le parametre embirque pour calculer la probabilté de chaque nœud.

E_v : la moyenne d'énergie des voisins d'un nœud.

E_z : l'énergie totale d'une zone.

Vn : les voisins de nœud n.

d : la distance qui sépare le nœud n de la SB.

Algorithme 3.1: formation des zones et sélection des CZs.

INFO: est un message qui possède la probabilité P_{cz} qu'un nœud de devient un CZ, et la liste des voisins V_n .

Successful: est un message pour informer les nœuds qui sont devenus des CZs.

Début

1 :// la division de réseau en plusieurs zone

2 : **Pour** s allant de 0 à H **Faire** // X valeur de notre choix pour dessiner une ligne verticale équivalente a la valeur X

3: **si** (Y< H) **alors**

4: **si** (X< W) **alors**

5: Y ← s*X; // dessiner une ligne horizontale équivalente à la valeur Y

6: **Fin Pour**

7 : **Pour** l allant de 1 à Z **Faire**

8: **si** ($X_n \leq X \ \& \ Y_n \leq Y$) **alors**

9: Id_zone ← 1 // Affecter à chaque nœud son ID-Zone

10: n(l) ← n(l) + 1;

11: N ← Tab1 [l] ; //sauvegarder le nombre de nœuds de chaque zone dans N

12: **Fin Pour**

13: **Pour** K allant de 1 à Z **Faire**; // chaque itération pour une zone

14: $P_{cz} = Er \div ((E_z * E_v)) + (\beta \div d)$;

15: **Envoyer-Vn** (INFO, V_n) ; //chaque nœud envoi leurs probabilités vers leur voisin

16: Tab3 [K] ← P_{cz} ; // sauvegarder les probabilités des nœuds de chaque zone

17: //la station de base choisir les CZs le nœud ayant une grande probabilité et mettre la probabilité de leur voisins a 0 ensuite choisir parmi le reste le meilleur et refaire l'élection des CZs.

18: czi=max (Tab3 [K]);

19: Tab3 [V_n]=0; // mettre les probabilités des voisins de nœud n à 0 ;

20: P_{v_czi} =0; // prévenir les voisins de devenues

21: Liste.add (cz); // ajouter le nouveau chef de zone au liste des CZs.

22: **Envoyer-CZ** (Successful,liste()) informer les CZs pour prendre leur rôle

23: **Fin Pour**

Fin

Phase d'envoi des données aux chefs de zone

Cette phase assure la collecte et l'acheminement des données captées par les nœuds vers le CZ en suit vers la SB, en utilisant le routage multi-sauts pour minimiser la consommation d'énergie des nœuds capteurs et augmenter la durée de vie du réseau. Ce routage d'information se base sur deux parties.

Transmission des données intra-zone

Après la division le réseau en plusieurs zones et l'élection de CZ pour chaque zone, les nœuds membres envoient leurs données captées au CZ de leur zone associé (voir la figure

3.2). Pour éviter les collisions lors de transmissions des données par les nœuds capteurs, en utilisant l'ordonnancement avec TDMA (voir la figure 3.3), qui alloue aux nœuds membres des slots de temps (time slot) appelés frames affectés par leurs CZs afin d'émettre leurs données sans risque de collision. Cela permet aux nœuds capteurs d'éteindre leur interface de communication en dehors de leurs slots afin d'économiser leurs énergies. Par suite ces données seront agrégées par le CZ afin d'éviter la redondance des données et la surconsommation d'énergie puis les envoyées à la station de base.

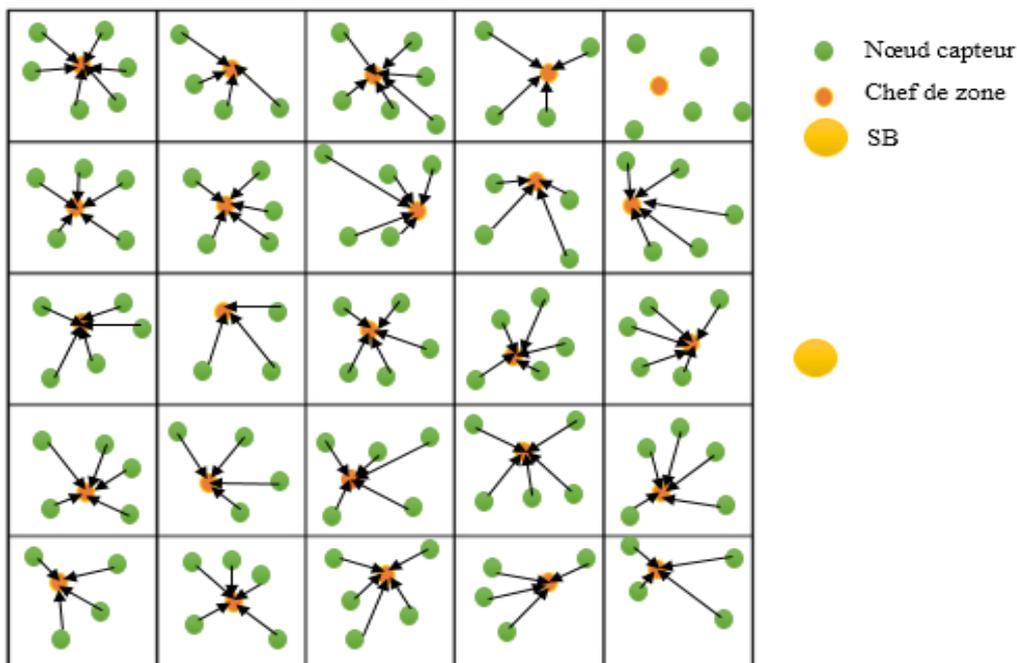


FIGURE 3.2 – envoie les données capturées au chef de zone.

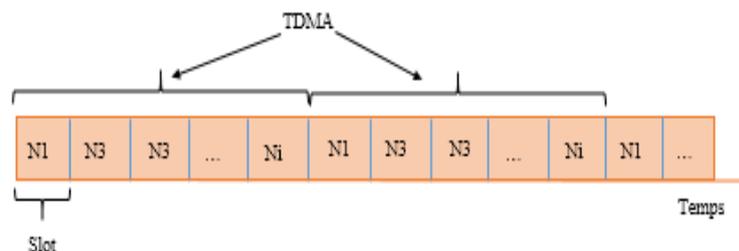


FIGURE 3.3 – ordonancement TDMA.

La formule 3.2 illustre comment le CZ choisit les nœuds qui veut envoyer leurs données au chef de zone, cette probabilité permet de réduire la charge de transmission au chef de zone, tel que le chef de zone ici reçoit les données de nœud ayant la plus grand probabilité

et met les autres nœud en attente jusqu'à terminé de transmission des données avec le premier nœud

$$PNI = \frac{1}{Dist_{nsCZ} * N_{msg}} \quad (3.2)$$

Ou :

PNi : probabilité d'envoyer une information par un nœud n.

Distns_cz : Représente la distance qui sépare le nœud source (ns) et le chef de zone (CZ).

N_msg : nombre de messages acheminés par ce nœud n.

L'algorithme suivant présent le principe de routage des données vers chef de zone et la station de base. En effet l'algorithme résume les deux parties précédentes, initialement le **N_msg** est égal à 1.

Déclaration :

Type_noeud : Booléen, (il prendre deux.

valeur : ordinaire ou CZ).

Tab1[i] : tableau qui stocke les distances entre la station de base et les membres de zone.

Tab2[i] : tableau qui stocke les probabilités des membres de zone pour être capable envoyer leurs données au CZ.

d : Représente la distance qui sépare le nœud source ns et le chef de zone.

N_msg : nombre de messages acheminés par un nœud n.

List : liste qui contient les probabilités des nœuds pour envoyer un message.

Algorithme 3.2: transmission des données vers chef de zone et la station de base

Capt_N : est un message qui contient des informations sur les paramètres ambiants, ce message transite vers le CH.

Capt_N1 : est un message qui contient des informations sur un ou plusieurs paramètres ambiants, et possède un entête pour informer tous les nœuds: 'acheminer ce message jusqu'à l'arrivé à la SB'.

Debut

1: N_msg ← 1;

2: Tab2 [i] ← 0;

3: List () ← null;

4: Time ← 0;

5: Constante seuil;

6: **Si** (type_noeud=='ordinaire') **alors**

7: Attendre un slot de temps

8: Quand un nœud n capte une information sur les paramètres ambiants, il envoie un message **capt_N** à leur CZ.

9: Quand un chef de zone CZ reçoit un message **capt_N1** il envoie un message de diffusion vers les CZs qui ont plus proche à la station de base pour acheminer ce message jusqu'à arriver au SB.

10: //chaque nœud calcule leur probabilité d'envoyer un message au CZ.

11: **Pour** i allant de 1 à **Length.Tab1** **Faire**

12: Pi ← 1 ÷ (N_msg*d);

13: Tab2 [i] ← Pi; // Sauvegarder les probabilités.

14: **Fin Pour**

15: // le CZ reçoit les données des nœuds ayant une grande probabilité en premier pour organiser leur travail

16: **Sinon Si** (type_noeud=='CZ ') **alors**

17: Attendre la réception des données

18: à la réception d'un message **capt_N**, le CZ agréger les données reçus, et fait suivre jusqu'à arriver à la station de base

19: **Fin si**

20: **Fin si**

21: **Pour** i allant de 1 à **Int (Length.Tab)** **Faire**

22: Liste.add (Tab2 [i]);

23: **Fin Pour;**

24: **Si** (Time<seuil) **alors**

25: **Si** (les données de message **capt_N** n'a pas été envoyé) **alors**

26: Envoyer-msg (capt_N1, members.Liste);

27: **Sinon**

28: Ignorer -msg (capt_N);

29: **Fin si**

30: **Sinon Si** (Time==seuil) **alors**

31: Time ← 0;

32: Time=Time+1; //déclencher temporisateur.

33: **Fin si.**

Fin.

Transmission des données inter-zone

Dans cette phase les données seront routée à la station de base selon le protocole SPEED on utilisant la communication inter-zone, seuls les chefs de zones ont le droit de participer dans cette phase comme montre la figure 3.4

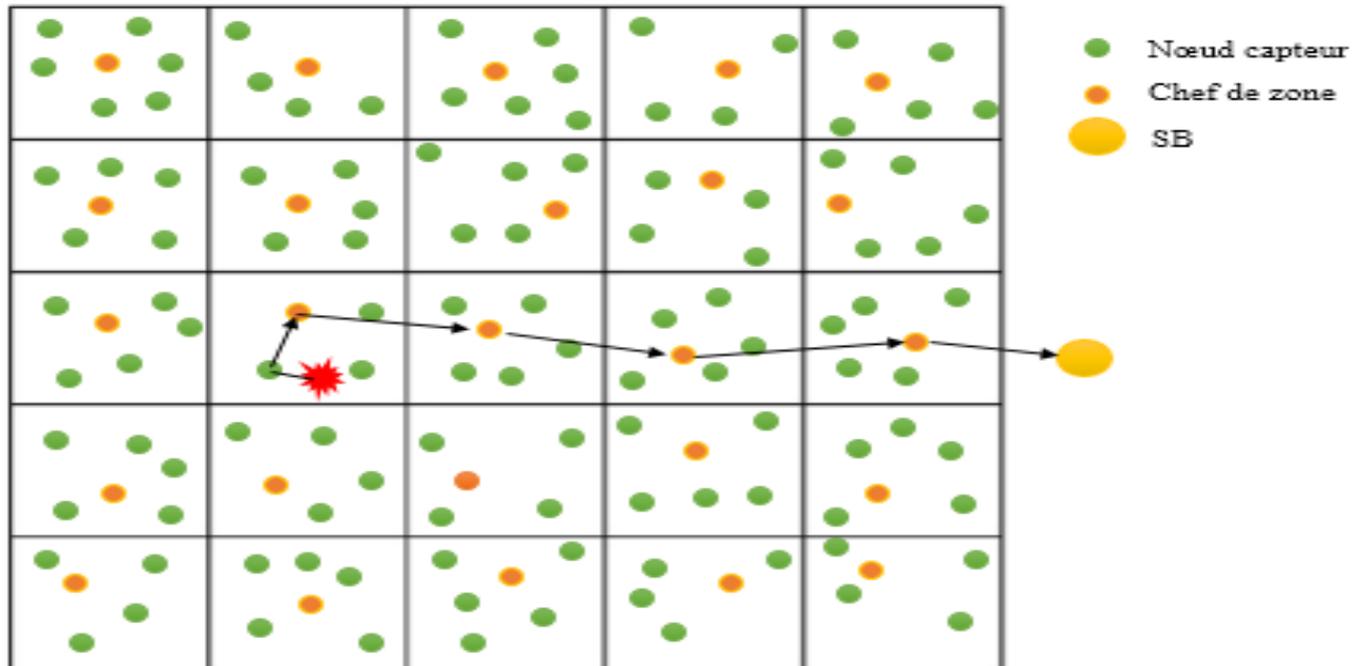


FIGURE 3.4 – outage des données inter-zone.

Phase de rotation de CZ

Après la phase de transmission des données, il nécessaire de faire une phase de maintenance à cause de la surcharge imposée sur les CZs par rapport aux nœuds capteurs ordinaires .En effet chaque chef de zone (CZ) consomme plus d'énergie par rapport aux autres nœuds et cela peut provoquer une panne dans le réseau (les CZs consomment rapidement leur énergie et mort rapidement). Pour remédier à ce problème, il faut faire un équilibrage énergétique entre les nœuds de même zone (rotation de rôle de CZ entre les nœuds) pour éviter la surcharge d'un nœud par rapport aux autres, et pour augmenter également la durée de vie de réseau.

Si CZ dépasse un certain seuil de nombre de messages à envoyer, le système détecte ça, et le CZ Informe les membres de sa zone pour sélectionner le nœud qui va devenir le chef de zone (nouveau CZ). En effet chaque nœud calcule sa probabilité de devenir un chef de zone, il utilise les mêmes critères que la formule (4.1), et envoie le résultat vers

le CZ courant .Ce dernier sélectionne le nouveau chef de zone et lui envoie un message de notification vers le nouveau CZ pour prendre les différentes rôles de CZ (agrégation et acheminement des données vers SB).

Déclaration :

M_cz : nombre de messages envoyé par CZ.

S_Msg : seuil de nombre de messages.

Tab[l] : tableau d'entier qui stocke le nombre de nœud dans chaque zone.

Tab1 [i] : tableau qui stocke les identificateurs des membres de CZ.

Tab2 [i] : tableau pour stocker les probabilités des membres de CZ.

DistSB_n : Représente la distance sépare le nœud n de la SB.

i, l, K : compteur.

Z : le nombre de zone dans le réseau.

Algorithme 3.3: rotation des CZs

Ready: message envoyé par le CZ courant pour informer les nœuds pour préparer vous de devenir un CZ.

Proba: message qui contient la probabilité qu'un nœud devient un chef de zone.

Successful: est un message pour informer le nœud qui est devenue CZ

Début

1 // rotation de CZ.

2 : **Pour** l allant de 1 à Z **Faire**

3 : N ← Tab[l] ;

4 : **Fin Pour**

5: **Pour** K allant de 1 à N **Faire**

6: **Si** (M_cz ≤ S_Msg) **alors**

7 : Envoyer-msg (**Ready**, Tab[i]); //on suppose le message arriver à tous les nœuds de même zone.

8: **Fin Si**

Fin Pour

// chaque nœud calculer la probabilité de devenir un CZ et envoi vers le chef de zone.

9: **Pour** i allant de 1 à Length.Tab1 **Faire**

10: $P_{cz} = E_r \div ((E_z * E_v)) + (\beta \div d)$;

11: Envoyer-msg (**Proba**, CZ).

12: Tab2 [i] ← P_i ; // le CZ Sauvegarder les probabilités des nœuds.

13: **Fin pour;**

14: **Pour** i allant de 1 à (Length.Tab2) **Faire**

15: CZ choisir Max.Tab2 [i]. //le nœud choisir par CZ devenir le nouveau CZ.

16: //le CZ envoie un message vers nœud n (le nouveau CZ) pour prendre le rôle de CZ

17: Envoyer-msg (**successful**, n);

18: // le nouveau CZ prendre les fonctionnalités au CZ

19: **Fin Pour**

22: **Fin Pour**

Fin

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre nouveau protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil. Le protocole proposé vise à maximiser la conservation d'énergie et la prolongation de la durée de vie du réseau. L'idée de notre protocole est inspirée de protocole SPEED et le mécanisme de clusterisation, puis on les a introduit quelques améliorations pour obtenir une nouvelle solution meilleure en termes de consommation d'énergie et de durée de vie du réseau.

Pour évaluer les performances de notre proposition, nous présenterons dans le chapitre suivant, les résultats de simulation.

Évaluation des performances

4.1 Introduction

La simulation est une technique de modélisation du monde réel. Elle consiste à modéliser un système en représentant toutes ses entités, leurs comportements et leurs interactions. En effet, la simulation est souvent moins couteuse par rapport à l'expérimentation et les résultats peuvent être obtenus beaucoup plus rapidement.

Dans ce chapitre, nous allons définir l'outil de simulation utilisé, scénario de simulation de notre proposition ainsi que le paramètre de performance utilisé. Ensuite nous allons implémenter notre protocole définis dans le chapitre précédent. Enfin, nous présenterons les différents résultats fournis par le protocole proposé.

4.2 Simulateurs de réseau de capteur sans fil

Il existe plusieurs simulateurs, parmi lesquels on retrouve :

4.2.1 NS-3 (Network Simulator)

NS-3 [39] est un simulateur réseau open source à événements discrets. Son noyau et ses modèles sont implémentés en C++, mais avec une interface de script Python.

L'objectif de NS-3 est de développer un environnement de simulation ouvert pratique pour la recherche dans les réseaux. Les outils `nam`, `ns3-viz` associés au simulateur NS permettent la visualisation des animations issues de la simulation telle que le transfert et la taille des paquets échangés, l'état des files d'attentes, etc.... .

4.2.2 OMNeT++

tout comme NS-3, OMNeT++ [40] est un simulateur réseau à événements discrets programmé en C++. Il peut être utilisé dans les deux types de réseaux filaires et sans fil.

4.2.3 AVRORA

AVRORA [41] est un simulateur spécialement conçu pour les RCSFs sous Java. Il offre une vaste gamme d'outils qui peuvent être utilisés dans la simulation des RCSFs. Cependant, ce dernier n'offre pas d'interface graphique.

4.2.4 OPNET (Optimum NETWORK Performance)

Openet [42] un simulateur à événement discret, il a été proposé premièrement par Massachusetts Institute of Technology (MIT) en 1986 et écrit en langage C++. OPNET est capable de simuler de grands réseaux de communication. Ce simulateur a été conçu pour fournir un environnement de travail complet pour la modélisation et la simulation d'un réseau. Il se décompose en trois parties : la partie modélisation, la partie teste et la partie évaluation chargée de l'analyse des résultats [43].

4.3 Environnement de simulation

Après l'étude des simulateurs de réseau de capteurs sans fil, nous avons choisi d'utiliser le logiciel Matlab pur simuler notre protocole. Par ce que la majorité des environnements sont très compliquées, et le temps nécessaire pour la prise en main de ces simulateurs était bien supérieur à l'utilisation d'un logiciel de programmation adapté à nos besoins.

MATLAB [44] est développé par la société The MathWorks, il est optimisé pour résoudre les problèmes scientifiques et techniques. C'est un langage basé sur les matrices, il allie mathématique, modélisation graphique et programmation.

MATLAB dispose d'une large bibliothèque de fonctions intégrées et pré-écrites avec des notations simples et puissantes pour de nombreuses tâches de calculs communes. Ces fonctions peuvent être construites dans tous les langages de programmation, MATLAB permet de les retrouver dans un seul endroit. La simulation du protocole proposé requiert l'utilisation et la manipulation de vecteurs, de tableaux et de matrices. Le côté évaluation

des performances quant à lui, requiert la génération de graphes, et donc l'utilisation des outils de traçage qu'offre MATLAB.

4.3.1 Paramètres de simulation

Dans la simulation de notre protocole nous avons utilisé des nœuds capteurs qui sont de même modèle et possédant les mêmes capacités de calcul et mémoire, la même portée de transmission, et une quantité différente d'énergie initiale. Pour la station de base l'énergie est illimitée.

Ces capteurs sont déployés dans une zone carrée de taille $100*100$ m² contenant 1000 nœuds capteurs déployés aléatoirement. Nous assumons que tous les nœuds ont une position fixe durant toute la période de simulation. Le tableau ci-dessous résume les paramètres utilisés :

Paramètres	Valeur
Nombre de station de base	1
La localisation de la station de base	(50, 50) m
Nombre de nœuds	1000
Surface de simulation	(100*100) m ²
Portée de transmission du capteur	30m

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

4.3.2 Description du système

Notre système représente une zone de captage carrée d'une surface de $(100*100)$ m² comportant 1000 capteurs et une SB. De ce fait, les entités de notre système sont :

La SB : elle est responsable de l'envoi des requêtes et de la collecte des données du réseau. **Les CZs** : ils agrègent les données et ils participent au routage des paquets dans le réseau. **Les nœuds ordinaires** : Ils servent à détecter les événements dans la zone de captage et les envoient à la station de base.

4.3.3 Variables descriptives du système

Afin de simuler notre protocole nous avons utilisé les paramètres montrés dans le tableau qui suit :

Définition de la variable	Nom de la variable	Type	Valeur	Unité de mesure
Energie initiale	E_{init}	Réel	1	Joule
Energie consommée lors de l'émission d'un paquet	$E_{transmission}$	Réel	10^{-5}	Joule
Energie consommée lors de la réception d'un paquet	$E_{recepteur}$	Réel	10^{-5}	Joule
Energie consommée lors de l'agrégation des données par un CZ	$E_{agregation}$	Réel	10^{-6}	Joule
Energie consommée pour effectuer un traitement	X	Réel	10^{-6}	Joule
Position d'un capteur	(X,Y)	(Réel, Réel)	Valeur entre 0 et 100	(Mètre, Mètre)
β	beta	Réel	10^{-4}	

TABLE 4.2 – Paramètres de simulation.

4.4 Evaluation des performances du protocole

On va présenter et analyser les résultats de simulations obtenus dans cette section. Nous allons présenter les résultats de chaque scénario.

4.4.1 Déploiement des nœuds

La figure 4.1 représente le déploiement des nœuds aléatoirement dans la zone de captage et la division de cette dernière en zones. Le carré rouge représente la station de base. Et les points bleus sont des nœuds ordinaires.

Le déploiement du réseau se fait avec les paramètres présentés précédemment (portée de transmission 30 m et un zone de captage $100 \times 100 \text{ m}^2$) permet de construire une architecture d'un réseau avec 25 zones et une station de base placée dans un position fixée à l'avance (50, 50) m

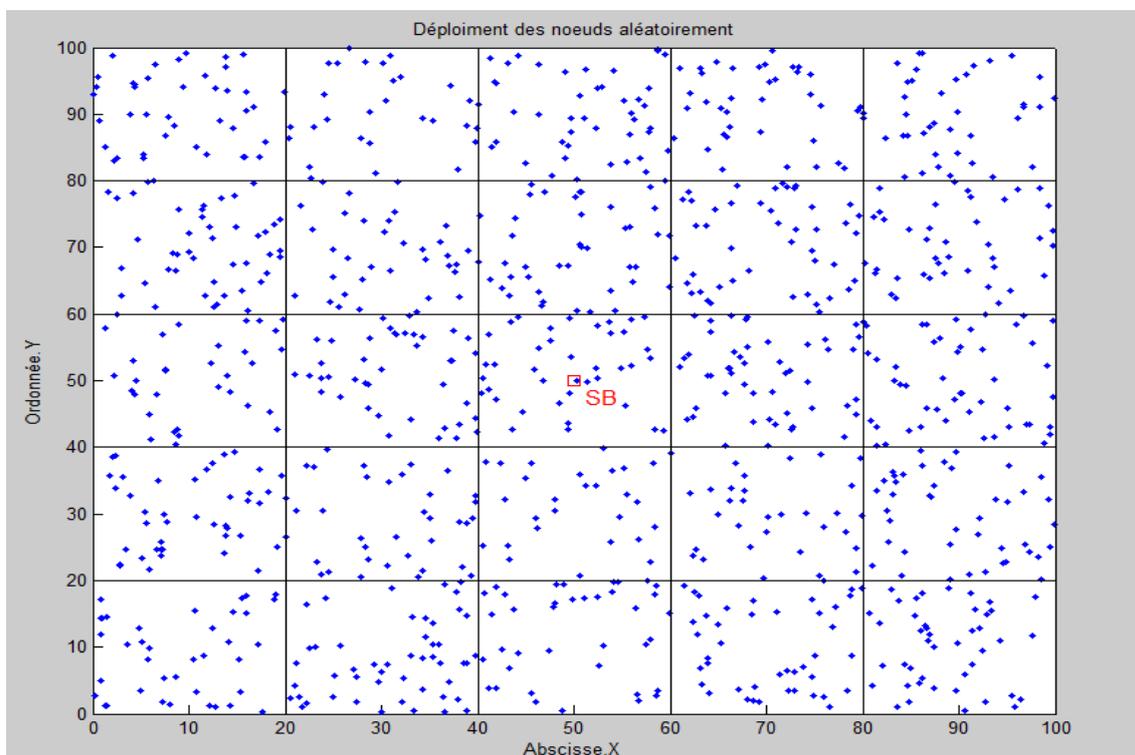


FIGURE 4.1 – Déploiement du réseau dans la zone de captage.

4.4.2 Sélection des chefs des zones

La figure ci-dessous illustre la zone de captage après la sélection des CZs de chaque zone. Les CZs sont entourés par un cercle rouge.

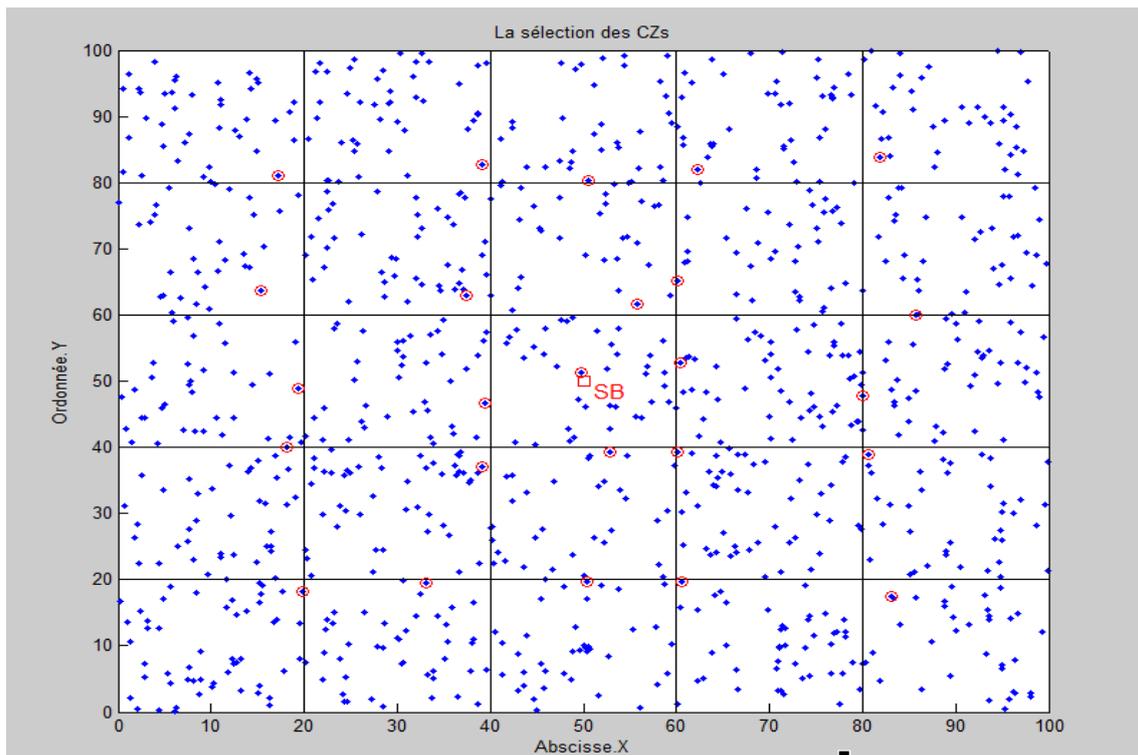


FIGURE 4.2 – sélection des chefs des zones.

4.4.3 Énergie restante dans chaque nœud après d'envoi un nombre des messages

La figure ce que suite représente l'énergie restante dans chaque nœud après l'envoi d'un nombre K de messages, ce nombre de messages dépend au nombre des nœuds de chaque zone. On a constaté que l'énergie restante dans tous les nœuds de même zone est identique 0.9952 J, en raison que l'énergie initiale et l'énergie consommé durant le traitement d'envoi est la même dans tous les capteurs.

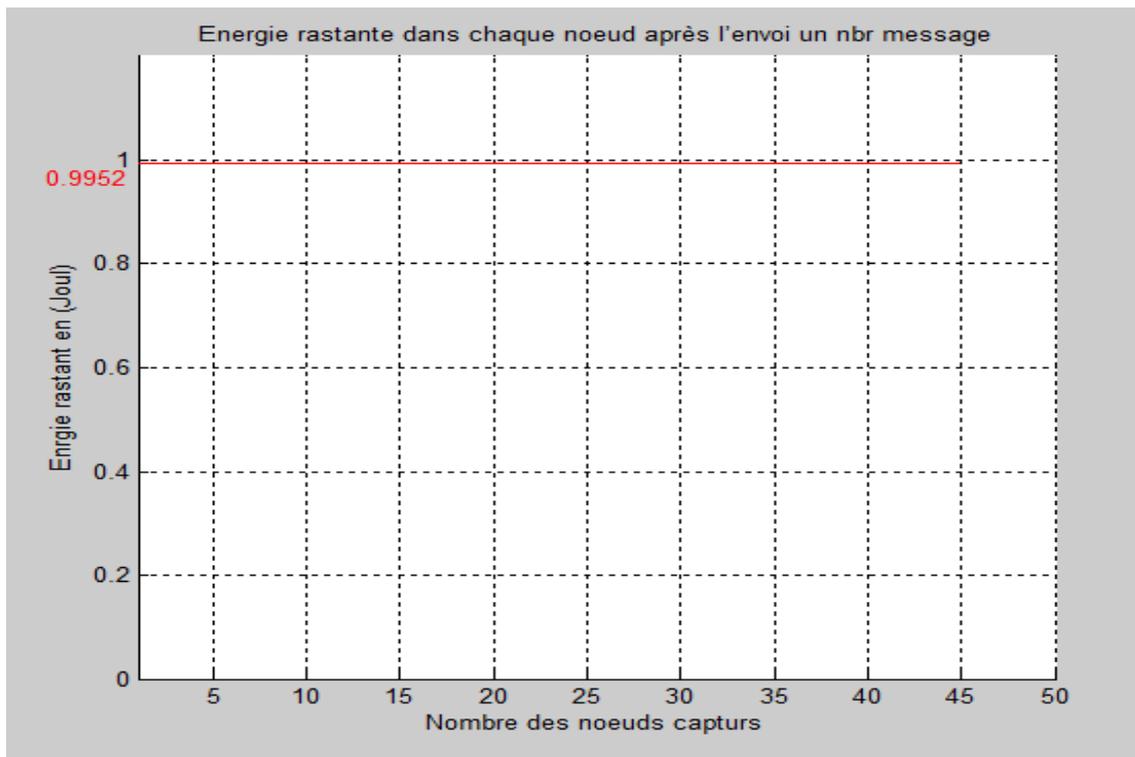


FIGURE 4.3 – Energie restante dans chaque nœud après l’envoi un nombre de message.

4.4.4 Energie restante dans les chefs des zones après l’envoi un nombre des messages

La figure ci-dessous montre une énergie restante équitable 0.09450 J dans tous les chefs de zone sélectionnée séquentiellement dans la même zone, cette énergie est plus réduite par rapport à l’énergie restante dans les nœuds. Cette réduction en termes d’énergie restante causé par le traitement d’agrégation car le chef de zone est le seul responsable d’envoyer ces des données fournis par ces membres de zone. De ce fait, le chef de zone doit être changé chaque fois s’il affecter une transmission d’un certaine nombre de messages.

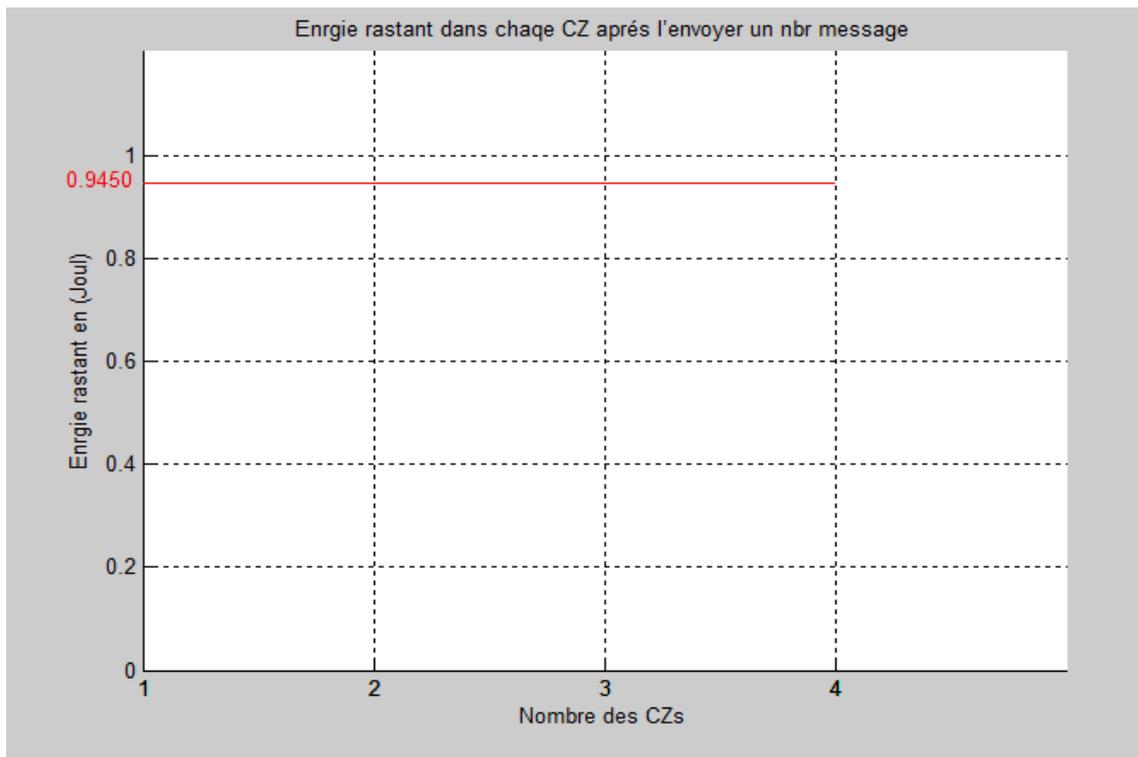


FIGURE 4.4 – énergie restante dans les CZs

4.4.5 La variation d'énergie en fonction de nombre des messages durant le changement du CZ.

Le graphe (a) illustre la variation d'énergie de CZ en fonction de nombre des messages envoyés, tel que l'énergie descend en parallèle quand le nombre des messages envoyé augmente, lorsque le chef de zone atteint le seuil (dans ce cas 2500 messages) des messages à transmettre il prend le rôle d'un nœud ordinaire comme montre le graphe (b).

Le graphe (c) présente la variation d'énergie d'un nœud capteur en fonction des messages envoyé, tel que l'énergie descend en parallèle quand le nombre des messages envoyé augmente. Le nœud dans le graphe (c) prend le rôle de chef de zone lorsque ce dernier atteint son seuil comme montre le graphe (a), et devient un chef de zone comme était illustré dans le graphe (d).

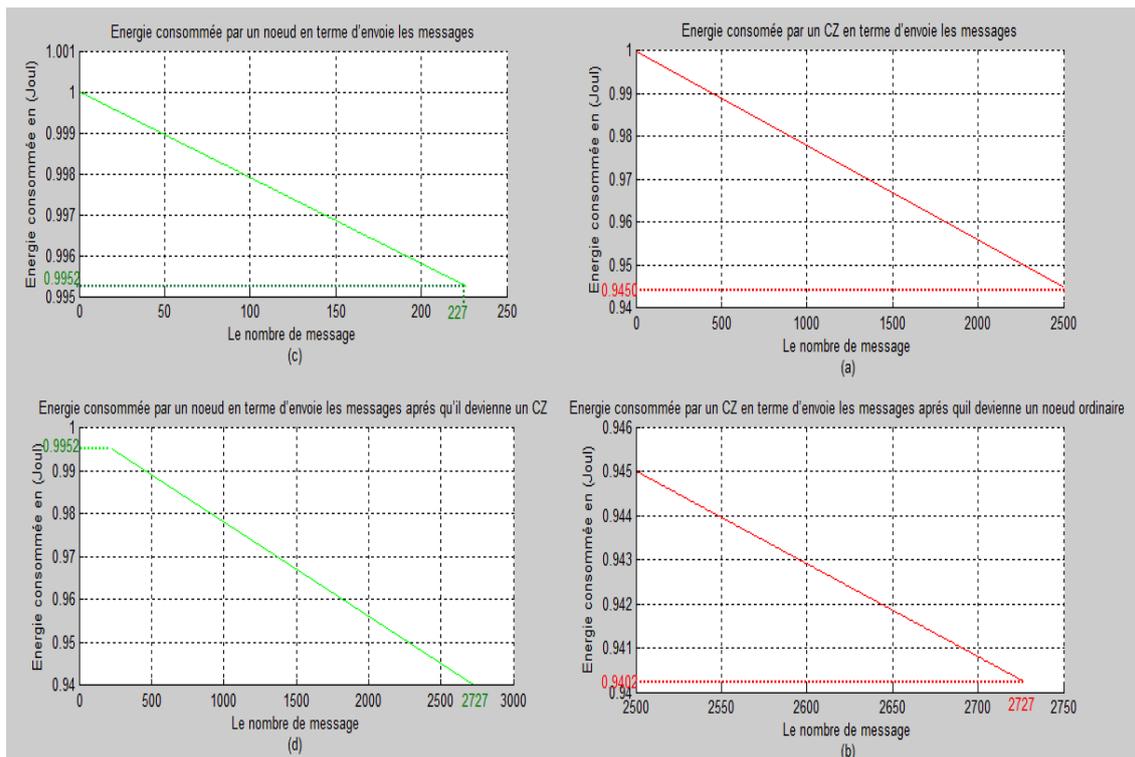


FIGURE 4.5 – rotation de CZ

4.4.6 Comparaison de notre protocole et le protocole Flooding

Le tableau ci-dessous montre l'énergie consommée dans notre protocole et dans le protocole Flooding. Ce dernier est plus grand que l'énergie consommée dans notre protocole parce que dans le Flooding un message peut être passé par tous les nœuds de réseau qui impose le problème d'inondation de l'information. D'où dans notre protocole, l'information peut dérouler au maximum par les chefs de zone du réseau. Donc notre proposition est plus efficace que le protocole de base Flooding.

	Instant(t)	Nombre des nœuds utilisé dans le rouage	Energie consommé(J)
Flooding	t1	10	0.0840
	t2	50	0.4200
	t3	120	1.0080
	t4	250	2.1000
	t5	500	4.2000
	t6	700	5.8800
	t7	850	7.1400
	t8	920	7.7280
	t9	1000	8.4000
	t10	1200	10.0800
Protocole proposé	t1	2	0.0252
	t2	3	0.0336
	t3	5	0.0504
	t4	8	0.0756
	t5	13	0.1176
	t6	17	0.1512
	t7	19	0.1680
	t8	20	0.1764
	t9	22	0.1932
	t10	25	0.2184

TABLE 4.3 – Comparaison de notre protocole et le protocole Flooding

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un scénario de simulation fait avec MATLAB, ce travail représente les différents résultats de notre protocole de routage qui base sur la localisation géographique en terme la qualité de service et la minimisation de la consommation d'énergie.

Conclusion générale

Ces dernières années, le développement des réseaux sans fil a continué de gagner en popularité dans les communautés scientifique et industrielle. En raison des progrès récents dans les domaines des technologies de communication sans fil, cette technologie est devenue un acteur clé dans les architectures de réseau actuelles, grâce à ses avantages diversifiés. Ces architectures comprennent des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ou en anglais Wireless Sensor Network (WSN).

Les réseaux de capteurs constituent un axe de recherche très fertile et peuvent être appliqués dans plusieurs domaines différents. Cependant il reste encore quelques problèmes à résoudre dans ce domaine afin de pouvoir les utiliser dans les conditions réelles.

Le travail consigné dans ce mémoire a été le fruit d'une recherche menée dans le contexte des RCSF et ce relativement aux problèmes de la qualité de service et de gaspillage d'énergie. Pour cela, nous avons présenté une introduction aux réseaux de capteurs sans fil et une étude critique d'un ensemble de protocoles de routage améliorant la qualité de service par minimisant la consommation d'énergie dans les RCSF.

Notre principale contribution est la proposition d'un nouveau protocole de routage basé sur la localisation géographique à basse consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs, il prend en considération les contraintes imposées par les capteurs, basse capacité de stockage et durée de vie limitée, en permettant une gestion plus efficace de la ressource énergétique lors de la communication des données dans le réseau. Il adopte une organisation des nœuds du réseau en zone. Cette configuration en zone offre une souplesse dans la communication des données captées vers la station de base. Le fonctionnement de Notre protocole est dans chaque zone. Cependant, le nombre de nœuds dans les différents zone est différent, et chaque zone a un chef de zone qui agrégé les données et les router

vers la station de base communiquant avec les autres chefs des zones utilisant le protocole SPEED.

L'évaluation des performances de notre protocole a été simulée en Matlab dans laquelle nous avons constaté que notre proposition est bien meilleure que le protocole Flooding.

Comme perspectives de notre travail, nous envisageons les points suivants :

- Etablir une comparaison de notre protocole avec plus de protocoles.
- Etudier le comportement de notre protocole dans un environnement mobile.
- Simuler notre protocole sous les simulateurs standards existants (ex. OPNET, NS2 . . . etc)

Bibliographie

Bibliographie

- [1] D. Rey. Collecte des données d'un réseau de capteurs sans fil en utilisant une surcouche réseau pair à pair. *Mémoire de fin de cycle, département de génie informatique et génie logiciel, école polytechnique de Montréal*, Avril 2010.
- [2] Fatma AMOKRANE. Routage avec optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. *Mémoire de fin de cycle, Département d'Informatique, Université De Bejaïa*, juin 2016.
- [3] Antoine Gallais. Ordonnancement d'activité dans les réseaux de capteurs : l'exemple de la couverture de surface. *diplôme doctorat, département mathématique, UNIVERSITÉ DES DE LILLE*, 26 juin 2007.
- [4] MELOUK Salima MAKHMOUKH Dehia. Approche de minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. *Mémoire de fin de cycle, Département d'Informatique, Université De Bejaï*, juin 2017.
- [5] W. Su Y. Sankarasubramaniam E. Cayirci Akyildiz, I.F. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2004.
- [6] A. de Castro I. Teixeira, J. F. de Rezende and A. C. P. Pedroza. Wireless sensor network : Improving the network energy consumption. *in XXI Symposium Brazilian Telecommunications, SBT'04, Belem, Brazil*, September 2004.
- [7] <https://www.omega.ca/fr/resources/senseurs-sans-fil>. juillet 2020.
- [8] S. Moad. Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. *mémoire master, Université IFSIC-Rennes 1*, 2008.

-
- [9] C. Duran-Faundez. Transmission d'images sur les réseaux de capteurs sans fil sous la contrainte de l'énergie. *Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1*, Juin 2009.
- [10] M. Bouallegue. Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. *Thèse de doctorat, Université du Maine*, 2016.
- [11] M-C. Vuran I.F. Akyildiz. Wireless sensor networks. *Jhon Wiley Sons*, 2010.
- [12] Y. Yaser. Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. *thèse de doctorat, Université de Haute Alsace Faculté des Sciences et Techniques*, 2011.
- [13] W. Su Y. Sankarasubramaniam I.F. Akyildiz and E. Cayirci. a survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40 :102–114, 2002.
- [14] R. Kacimi. Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs : sans fil. *Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France*, Septembre 2009.
- [15] Inc. ZigBee Practel. Technology for wireless sensor networks. April 2006.
- [16] aribi Bilal hadjadj Abdelkrim. Réseaux de capteurs sans fil pour le contrôle des paramètres ambiants dans un bâtiment d'élevage de volaille. *mémoire fin de cycle, Université de Bouira*, 2018.
- [17] F. Dowla F. Nekoogar and A. Spiridon. Self -organization of wireless sensor networks using ultra-wideband radios. *Atlanta, GA, United States*, September 2004.
- [18] Massicilia YAHIAOUI. Un algorithme distribué pour la localisation dans les rcsfs. *Mémoire de Master. Université A/Mira. Bejaïa*, 2016-2017.
- [19] Mounya Amal SARI. Étude du rssi pour l'estimation de la distance dans les réseaux de capteurs sans fil. *Mémoire de master 2. Réseaux et Systèmes Distribués. Université Abou Bakr Belkaid. Tlemcen*, 2016/2017.
- [20] Belouatek Mohammed Abdesselam Abdelhalim. Conception d'un algorithme de routage basé sur l'heuristique du recuit simulé pour les réseaux de capteurs à grande échelle. *Mémoire de Master en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid- Tlemcen*, 2013.
- [21] S. Hedetniemi and A. Liestman. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks. *Wireless Sensor Network, Vol.3 No.10*, October, 2011.

-
- [22] AIT ALIOUA Malika BENTARA Nassima. Evaluation des performances d'un protocole de routage multi-chemins dans les rcsfs. *Mémoire de fin de cycle, département informatique, Université A/Mira de Bejaïa*, 2017.
- [23] M. Younis K. Akkaya. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Rapport de recherche, University of Maryland. Baltimore Country*, 2005.
- [24] B. SAHRAOUI. Etude d'un protocole de routage basé sur les colonies de fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil. *Mémoire de Master, Université Abou Baker Belkaid- Tlemcen*, 2003.
- [25] Heidemann J. Xu, Y. and D Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. *in the Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01), pp. 70-84. Rome, Italy. 2001.*
- [26] Tébessi Kamel. Algorithmes de routage pour les réseaux de capteurs. *Mémoire de Magistère, département informatique, Université L'arbi ben M'hidi Oum El Bouaghi*, 2009.
- [27] T. He and al. Speed : A stateless protocol for real-time communication in sensor networks. *in the Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems, pp. 46- 55, Providence, RI, 2003.*
- [28] Ross K. W Kurose, J. F. Computer networking a top-down approach featuring the internet. *Addison Wesley Longman Inc.*, 2000.
- [29] A. R. Rebai. Optimisation globale de la qualité de service dans les réseaux locaux sans fils de type ieee 802.11 : Mise en œuvre de nouveaux mécanismes de gestions de qos pour la couche d'accès. 2007.
- [30] S. Park V. Raghunathan, C. Schurgers and M. B. Srivastava. Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, mars 2002.
- [31] Yaser Yousef. Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. *Thèse de Doctorat, Université de Haute Alsace - Mulhouse*, 2010.
- [32] L.Kleinnrock H.Takagi. Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals. *EEE Transaction on Communication, vol.32, no3, pp.246-257, Mars 1984.*

-
- [33] M. Khelifi. Optimisation de la consommation de l'énergie et maximisation de la durée de vie des réseaux capteurs sans fil. *Thèse de doctorat, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa*, 2008.
- [34] PravinBhagwat Charles E Perkins. Highly dynamic destination sequenced distance vector routing dsdv for mobile computers. *SIGCOMM*, 1994.
- [35] S.Boulfekhar. Approche de minimisation d'énergie dans les réseaux de capteurs. *Thèse Magister ReSyD, Algérie*, 2006.
- [36] Abbas Jamalipour Joel Rodrigues. A development of secure and optimized aodv routing protocol using ant algorithm. Novembre 2013.
- [37] Prince Samar Zygmunt j. Haas, Marc r. Pearlman. the zone routing protocol (zrp) for ad hoc networks. *Internet Draft*, 1999.
- [38] Emin G˘un Sirer SHARP Venugopalan Ramasubramanian, Zygmunt J. Haas. A hybrid adaptive routing protocol for mobile ad hoc networks. *Cornell University, Ithaca, NY 14853*.
- [39] Ns-3. <https://www.nsnam.org/>.
- [40] Omnet++. <https://omnetpp.org/intro/>.
- [41] Avrora. <http://compilers.cs.ucla.edu/avrora/>.
- [42] B.G. ; Kocian A. ; McMeekin S.G. Hammoodi, I.S. ; Stewart. A comprehensive performance study of opnet modeler for zigbee wireless sensor networks. *Third International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, NGMAST '09, pp 357 – 362.*, 2009.
- [43] A.Makhlouf A.Zibouda. Gestion efficace du budget énergétique dans le protocole pegasis. *Science of Electronics Technologies of Information and Telecommunications (SETIT), Tunisia*, 2012.
- [44] Matlab. <http://fr.mathworks.com/products/matlab/>. Consulté le : 09-01-2021.

Résumé

Durant ce mémoire, nous avons abordé des problématiques liées au routage visant la qualité de service dans le réseau de capteur sans fil. Nous avons fait tout d'abord une étude critique sur les protocoles de routage qui basent sur la qualité de service. Pour cela, un protocole de routage SPEED, a été développé pour prendre en charge la communication en temps réel. Cependant, l'utilisation de ce protocole dans un réseau de capteurs intensif à grande échelle augmentera le nombre total de paquets de données de contrôle générés, ce qui entraînera: une surcharge du réseau, la diminution de la durée de vie du réseau.

De ce fait, nous avons proposé un protocole de routage adaptatif pour résoudre ce problème et afin de confirmer les améliorations apportées par notre proposition, nous avons réalisé une simulation avec MATLAB.

Mots clés : Réseau de capteur, protocole de routage, consommation d'énergie, MATLAB, SPEED.

Abstract

During this thesis, we addressed issues related to routing aimed at quality of service in the wireless sensor network. We first made a critical study of routing protocols based on quality of service. For this, a SPEED routing protocol was developed to support real-time communication. However, using this protocol in an intensive large-scale sensor network will increase the total number of control data packets generated, which will result in: network overload, decrease in network lifetime.

Therefore, we proposed an adaptive routing protocol to solve this problem and in order to confirm the improvements made by our proposal, we carried out a simulation with MATLAB.

Keywords: Sensor network, routing protocol, power consumption, MATLAB, SPEED.

ملخص

خلال هذه الأطروحة، تناولنا القضايا المتعلقة بالتوجيه الذي يهدف إلى جودة الخدمة في شبكة المستشعرات اللاسلكية. قمنا أولاً بإجراء دراسة نقدية لبروتوكولات التوجيه بناءً على جودة الخدمة، ولهذا تم تطوير بروتوكول توجيه SPEED لدعم الاتصال في الوقت الفعلي. ومع ذلك، فإن استخدام هذا البروتوكول في شبكة مستشعرات واسعة النطاق مكثفة سيزيد من العدد الإجمالي لحزم بيانات التحكم التي تم إنشاؤها، مما سيؤدي إلى زيادة التحميل على الشبكة، وانخفاض في عمر الشبكة.

لذلك، اقترحنا بروتوكول توجيه تكيفي لحل هذه المشكلة ومن أجل تأكيد التحسينات التي أدخلها اقتراحنا، أجرينا محاكاة باستخدام MATLAB.

الكلمة المفتاحية: شبكة الاستشعار، بروتوكول التوجيه، استهلاك الطاقة، SPEED ، MATLAB.