

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira de Béjaïa  
Faculté des Sciences Exacte  
Département d'Informatique

*Mémoire de fin d'études*

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

Option

Administration et Sécurité des Réseaux

Thème

---

**Le routage opportuniste dans les réseaux de  
capteurs sans fil**

---

Présenté par

M<sup>r</sup> Khaled MESSAD  
M<sup>r</sup> Lounis RAHMANI

Soutenu le 02 juillet 2016, devant le jury composé de :

Présidente N. HAMADOUCHE	MCB	Université de Béjaïa
Promoteur S. BOULFEKHAR	MCA	Université de Béjaïa
Examinatrice L. SELLAMI	MAA	Université de Béjaïa
Examinatrice A. TIAB	Doctorante	Université de Béjaïa

Promotion 2015 – 2016

# REMERCIEMENTS

Grâce à Dieu vers lequel vont toutes les louanges, ce travail s'est accompli.

Nous tenons tout d'abord à remercier sincèrement Mme.Samra Boulefkhar pour son encadrement et pour le soutien qu'elle nous a apporté pour l'accomplissement de ce travail de fin d'étude et surtout pour ses qualités professionnelle et humaine.

Nous n'omettrons jamais d'exprimer toute notre gratitude à T.Amel pour sa collaboration pendant la réalisation de ce projet, ses soucis de travail ainsi que ses encouragements.

Nous tenons, également, à remercier vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce modeste travail.

Nous aimerions également remercier nos familles et tous nos amis et camarade pour leur soutien et aide qui nous en ont donné la force d'aller toujours vers l'avant.

Nous souhaitons témoigner notre gratitude et vifs remerciements envers tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# DÉDICACES

*A mon très cher Papa,*

*A ma très adorable Maman,*

*A mes deux chers frères Adel et Yacine,*

*A la mémoire de mon grand père,*

*A ma très cher grande mère,*

*A toute ma famille, cousins et cousines,*

*A toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin.*

***LOUNIS***

# DÉDICACES

*A mon très cher Papa,*

*A ma très adorable Maman,*

*A mon cher frère Moussa,*

*A toute ma famille, cousins et cousines,*

*A toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin.*

***KHALED***

# Table des matières

Table des Matière	i
Liste des figures	iii
Liste des Tableaux	iv
Liste des Acronymes	vi
Introduction générale	1
<b>1 Les réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	4
1.2 Qu'est-ce qu'un capteur . . . . .	4
1.3 Les réseaux Ad-hoc . . . . .	4
1.3.1 Principe de fonctionnement d'un réseau Ad hoc . . . . .	5
1.4 Les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	5
1.4.1 Notion d'un réseau de capteur sans fil . . . . .	6
1.4.2 Comparaison entre réseau de capteurs et réseau ad-hoc . . . . .	7
1.4.3 Architecture d'un réseau de capteur sans fil . . . . .	7
1.4.4 Types d'architectures des réseaux de capteurs . . . . .	8
1.4.5 Architecture d'un nœud capteur . . . . .	9
1.4.6 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	12
1.4.7 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	13
1.4.8 Types d'applications des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	14
1.4.9 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	15
1.5 Conclusion . . . . .	17
<b>2 Les protocoles de Routage des réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>18</b>
2.1 Introduction . . . . .	19
2.2 Routage à consommation d'énergie minimale dans les réseaux de capteurs .	20
2.2.1 Route à énergie disponible maximum . . . . .	20
2.2.2 Route à énergie de transmission minimale . . . . .	20
2.2.3 Route a nombre de sauts minimum . . . . .	20
2.2.4 Route a nœud ayant le maximum de minimum des énergies disponible	20
2.3 Protocoles de routage pour un réseau de capteurs sans fil . . . . .	20
2.3.1 Protocoles de routage basés sur la structure du réseau . . . . .	21
2.3.2 Protocoles basés sur l'initiateur de communication . . . . .	25
2.3.3 Routage basés sur le fonctionnement des protocoles . . . . .	25
2.4 Conclusion . . . . .	28

<b>3</b>	<b>Le routage opportuniste dans les RCSFs</b>	<b>29</b>
3.1	Introduction . . . . .	30
3.2	Notion de routage opportuniste . . . . .	31
3.2.1	Définition . . . . .	31
3.2.2	Principe de fonctionnement . . . . .	31
3.3	Avantages du routage opportuniste . . . . .	32
3.3.1	Augmenter la fiabilité . . . . .	32
3.3.2	Augmente la qualité de la transmission . . . . .	32
3.3.3	Détermination efficace des nœuds d'expédition . . . . .	32
3.3.4	Optimisation d'énergie . . . . .	32
3.3.5	détermination efficace des nœuds d'expédition . . . . .	33
3.4	Composants du routage opportuniste . . . . .	33
3.4.1	La sélection des candidats . . . . .	33
3.4.2	Coordination des candidats . . . . .	33
3.4.3	Filtrage des candidats relais . . . . .	34
3.5	Métriques de routage opportuniste . . . . .	34
3.5.1	Métrique nombre de saut . . . . .	34
3.5.2	Métrique ETX . . . . .	35
3.5.3	Métrique ETT . . . . .	35
3.5.4	Métrique EAX . . . . .	35
3.6	Classes des protocoles de routage opportuniste . . . . .	35
3.6.1	Selon la méthode de sélection de l'expéditeur . . . . .	35
3.6.2	Selon la métrique pour le classement par ordre de priorité . . . . .	36
3.6.3	Selon la Coordination distributive pour le classement par ordre de priorité . . . . .	36
3.6.4	Selon le choix déterministe / probabiliste de l'expéditeur . . . . .	37
3.6.5	Selon la topologie / localisation . . . . .	37
3.6.6	Selon le Codage de données . . . . .	37
3.7	Les protocoles de routage opportuniste . . . . .	38
3.7.1	Extreme Opportunistic Routing (ExOR) . . . . .	38
3.7.2	Mac independant and Opportunistic Routing and En-Coding (MORE ) . . . . .	39
3.7.3	Simple Opportunistic Adaptive Routing Protocol (SAOR) . . . . .	39
3.7.4	Geographic Random Forwarding (GeRaF) . . . . .	39
3.7.5	Opportunistic Routing in Dynamic Ad Hoc Networks (OPRAH) . . . . .	40
3.7.6	Energy-Efficient Opportunistic Routing in Wireless Sensor Networks(EEOR) . . . . .	40
3.7.7	Resilient and Opportunistic routing solution for Mesh Networks (ROMER) . . . . .	41
3.7.8	Directed Transmission Routing Protocol (DTRP) . . . . .	41
3.7.9	Opportunistic Routing in Wireless Networks with Segmented Net- work Coding (CodeOR) . . . . .	41
3.7.10	A Novel Cooperative Opportunistic Routing Scheme in Mobile Ad Hoc Networks (CORMAN) . . . . .	42
3.7.11	Opportunistic Any Path Forwarding (OAPF) . . . . .	42
3.7.12	Hybrid ARQ-based intra-cluster geographically-informed relaying (HARBINGER) . . . . .	42
3.8	Comparaison entre les différents protocoles de routage opportuniste . . . . .	43

3.9	Conclusion . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Le protocole ExOR hiérarchique</b>	<b>48</b>
4.1	Introduction . . . . .	49
4.2	Protocole de routage opportuniste ExOR . . . . .	49
4.2.1	Fonctionnement . . . . .	49
4.2.2	Avantages de ExOR . . . . .	50
4.2.3	Inconvénient de ExOR . . . . .	50
4.3	Protocole ExOR Hiérarchique proposé . . . . .	51
4.3.1	L'idée de base . . . . .	51
4.3.2	Principe de fonctionnement . . . . .	53
4.3.3	Avantages de ExOR hiérarchique . . . . .	54
4.3.4	Exemple montrant le fonctionnement de ExOR hiérarchique . . . . .	55
4.4	Evaluation de performances de ExOR hiérarchique . . . . .	56
4.4.1	Le choix de simulateur Matlab . . . . .	56
4.4.2	Métriques de performances . . . . .	57
4.4.3	Paramètres de simulation . . . . .	58
4.4.4	Résultat de la simulation . . . . .	59
4.5	Conclusion . . . . .	61
	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>62</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>64</b>

# Table des figures

1.1	Réseau Mobile Ad hoc . . . . .	5
1.2	Exemple De Réseau De Capteurs . . . . .	6
1.3	Exemple d'une architecture de réseau de capteurs . . . . .	8
1.4	Types d'architectures des réseaux de capteurs . . . . .	9
1.5	les composants d'un capteur . . . . .	11
1.6	Pile protocolaire . . . . .	15
2.1	Classe des protocoles de routage dans les RCSFs . . . . .	21
2.2	Protocole de routage basé sur la structure du réseau . . . . .	21
2.3	Routage à Plat . . . . .	22
2.4	Routage hiérarchique . . . . .	23
2.5	Routage géographique . . . . .	24
2.6	Protocole basé sur l'initiateur de la communication . . . . .	25
2.7	Routage basé sur le fonctionnement des protocoles . . . . .	26
3.1	Illustration principe de fonctionnement du routage opportuniste . . . . .	32
3.2	Classes des protocoles de routage opportuniste. . . . .	46
4.1	Probabilités qu'un paquet soit délivré à une destination utilisant ExOR. . . . .	55
4.2	Probabilités qu'un paquet soit délivré à une destination utilisant le protocole proposé . . . . .	55
4.3	Moyenne d'énergie consommée . . . . .	59
4.4	Durée de vie du réseau . . . . .	60
4.5	Délai de bout en bout . . . . .	61



# Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre réseau de capteurs et réseau ad-hoc . . . . .	7
3.1	Classification des protocoles de routage opportuniste . . . . .	44
4.1	Paramètres de simulation . . . . .	58
4.2	Caractéristiques de la machine . . . . .	58

# Liste des Acronymes

ACK	Aquittement
ARQ	Automatic Repeat reQuest
CDMA	Code Division Multiple Access
CH	Cluster Head
CHA	Cluster Head Assistant
CHC	Cluster Head Chef
CTS	Clear To Send
DBBM	Délai Moyen de Bout en Bout
DD	Directed Diffusion
DTRP	Directed Transmission Routing Protocol
EAX	Expected Any-path Transmission
EEOR	Energy Efficient Opportunistic Routing
ETE	End-To-End
ETT	Expected Transmission Time
ETX	Expected Transmission Count
ExOR	Extreme Opportunistic Routing
FEC	Forward Error Correction
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
GEAR	Geographic and Energy Aware Routing
GeRaF	Geographic Random Forwarding
GPS	Global Positioning System
HARBINGER	Hybrid ARQ-based intra-cluster geographically-informed relaying
HBH	Hop-By-Hop
HC	Hop-Count
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile Ad hoc NETwork
MEMS	Micro-Electro Mechanical
MORE	Mac independant and Opportunistic Routing and En-Coding)
OAPF	Opportunistic Any Path Forwarding
OPRAH	Opportunistic Routing in Dynamic Ad Hoc Networks
OS	Operating System
OSI	Open Système Interconnexion
PEGASIS	Power Efficient GATHERing in Sensor Information System
QoS	Quality of Service
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil
RO	Routage Opportuniste
ROMER	Resilient and Opportunistic routing solution for Mesh Networks
RTS	Request To Send
SAR	Sequential Assignment Routing
SAOR	Simple Opportunistic Adaptive Routing Protocol
SB	Station de Base
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
TCP	Transmission Control Protocol
TEEN	Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network

TDMA	Time Division Multiple Access
Tiny OS	Tiny Operating System
TMLP	Taux Moyen de Livraison de Paquets de données
TX	Transmission Count

# 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. De ce constat une nouvelle architecture a vu le jour : les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Ce type de réseaux est le résultat de la fusion de deux pôles de l'informatique moderne, à savoir : les systèmes embarqué et les communications sans fil. C'est l'un des domaines les plus actifs pour la recherche et le développement car grâce à ses divers avantages, cette technologie a pu s'instaurer comme acteur incontournable dans les architectures réseaux actuelles. Le média hertzien offre en effet des propriétés uniques, qui peuvent être résumées en trois points : la facilité du déploiement, l'ubiquité de l'information et le coût réduit d'installation. Un RCSF est un ensemble de capteurs autonomes à faible coût, interconnectés par un réseau de communications sans fil, capables d'effectuer des mesures sur l'environnement pour construire une vue globale de la région contrôlée. Son but est la collecte d'un ensemble de grandeurs environnementales, physiques ou physiologiques entourant ces capteurs, telles que la température, l'humidité, glycémie, ou tension, etc., afin de les acheminer vers des centres de contrôle.

L'acheminement des données dans un RCSF utilise la notion de routage. Ce dernier est le processus qui permet de sélectionner des chemins dans un réseau pour transmettre des données depuis un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destinataires. Pour effectuer le routage, la nécessité d'implémenter un protocole de routage dans le réseau est primordiale, ces protocoles peuvent varier suivant les différentes approches de routage, bien que l'objectif principal est d'acheminer les paquets de données de la source vers la destination en tenant en compte certaines contraintes, comme la consommation d'énergie, de ce fait augmenter la longévité du réseaux.

Notre travail consiste à étudier les réseaux de capteurs sans fil, et plus exactement le concept de routage opportuniste, ce dernier est un nouveau mécanisme de routage qui exploite le concept de diffusion dont les réseaux sans fil sont caractérisé pour acheminer convenablement des paquets.

Dans les protocoles opportunistes, le schéma de communication décompose l'établissement du chemin suivi par un paquet de données en deux sous-problèmes :

- (i) Quel est l'ensemble des nœuds susceptibles de retransmettre un paquet de données en provenance d'une source donnée ?
- (ii) Qui parmi les nœuds de cet ensemble ayant reçu le paquet de données doit retransmettre ?

Pour répondre à ces deux questions le protocole que nous avons proposé EXOR hiérarchique se déroule en deux phases : phase de sélection des candidats et phase de coordination et de transmission. Après que le RCSF soit structuré en clusters, viens l'étape d'élection des Cluster Head candidats suivant une métrique précise, puis on trouve la deuxième phase qui la coordination ou le protocole sélectionne le nœud relais potentiel. Enfin, la transmission des messages par le biais de cluster head le plus prioritaire sélectionné dans la 2<sup>ème</sup> étape.

Pour relater les travaux réalisés dans le cadre de notre projet, notre mémoire s'articule autour des quatre chapitres suivants :

Dans le premier chapitre, nous présentons les RCSFs, leurs caractéristiques et leurs concepts.

Le deuxième chapitre traite le routage dans les réseaux de capteurs sans fil.

Dans le troisième chapitre, nous présentons notre thème d'étude avec plus de détails à savoir le routage opportuniste dans les RCSFs.

Dans le quatrième chapitre, nous allons décrire le nouveau protocole appelé ExOR Hiérarchique basé sur un protocole de routage opportuniste combiné avec le concept de clustering pour une bonne optimisation d'énergie.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

# Chapitre 1

## Les réseaux de capteurs sans fil

## 1.1 Introduction

Les technologies permettant la transmission sans fil des informations sont désormais d'usage courant, de ce fait, le marché des réseaux et des applications sans fil a connu une évolution spectaculaire. De ce fait, une nouvelle architecture pour un nouveau type de réseaux ad hoc appelée : Les réseaux de capteurs sans fil ( RCSF ) fait son apparition, cette dernière est le résultat de la combinaison de deux pôles de l'informatique moderne à savoir les systèmes embarquées et les communications sans fil.

Il s'agit donc, de petites unités miniaturisées appelées capteur communiquant entre elles via des transmissions radio et dotées de capacités d'acquisition et de communication des informations à une faible portée d'une manière autonome, ces dispositifs sont déployés aléatoirement dans une zone d'intérêt appelée « champ de captage » pour superviser ou surveiller des phénomènes divers. Après le déploiement initial, les capteurs peuvent s'auto-organiser en une infrastructure réseau appropriée.

L'objectif de ce chapitre est de présenter des généralités sur les capteurs et les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures et leurs caractéristiques etc.

## 1.2 Qu'est-ce qu'un capteur

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable d'accomplir trois tâches complémentaires : le relevé d'une grandeur physique, le traitement éventuel de cette information qui sera élaborée a une autre grandeur de nature différente (très souvent électrique), et la communication avec d'autres capteurs. L'ensemble de ces capteurs déployés pour une application forme un réseau de capteurs [5] [18].

## 1.3 Les réseaux Ad-hoc

Les réseaux Ad hoc (ou MANET, pour Mobile Ad hoc Network) sont des réseaux sans fil formés par un ensemble de nœuds interconnectés par des liens sans fil et qui s'organisent seul et de manière totalement décentralisé, autrement dit sans infrastructure fixe, chaque nœuds du réseau peut recevoir et envoyer des informations mais il agit aussi comme un routeur pour transférer d'autres données aux autres nœuds du réseau.

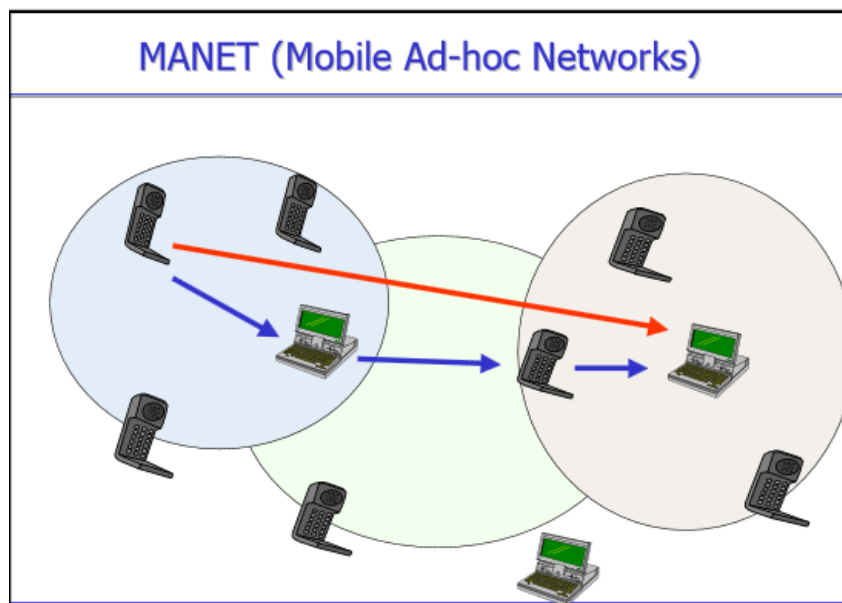


FIGURE 1.1 – Réseau Mobile Ad hoc

Le fait que les réseaux ad hoc sont des réseaux sans fil alors ils héritent des mêmes propriétés et problèmes liés à ces derniers. Particulièrement, le fait que le canal radio soit limité en termes de capacité, plus exposé aux pertes (comparé au médium filaire) et sujet à des variations dans le temps. En outre, les liens sans fil sont asymétriques et non sécurisés [29] [19].

### 1.3.1 Principe de fonctionnement d'un réseau Ad hoc

On dit qu'un nœud B est voisin d'un autre nœud A, si B se trouve dans la zone d'émission de A. Donc, il faut définir des règles de gestion d'accès. En ce sens, lorsqu'un nœud émet, tous ses voisins ne peuvent être qu'en mode réception. A cause de la limite de la portée de transmission des nœuds. Des relais (appelés aussi messagers) doivent être définis pour assurer la communication entre deux nœuds qui ne s'entendent pas (hors de la portée l'un de l'autre). Ce processus est appelé routage multi-sauts (ou Multi-hop routing). Ainsi, tous les nœuds d'un réseau Ad hoc coopèrent pour assurer les services fournis habituellement par les stations de base dans les réseaux avec infrastructure [6].

## 1.4 Les réseaux de capteurs sans fil

Grâce aux avancées conjointes des systèmes micro-électroniques et mécaniques (MEMS : Micro-Electro Mechanical Systems), des technologies sans fil, et de la microélectronique embarquée, les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) ont pu voir le jour.



### 1.4.1 Notion d'un réseau de capteur sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil sont considérés comme un type spécial des réseaux Ad hoc où l'infrastructure fixe de communication et l'administration centralisée sont absentes et les nœuds jouent, à la fois, le rôle des hôtes et des routeurs [19].

Un réseau de capteurs est composé d'un nombre souvent très important de nœuds qui sont, soit posés à un endroit précis, soit dispersés aléatoirement (souvent déployés par voie aérienne à l'aide d'avions ou hélicoptères). Ce dispersement aléatoire des capteurs nécessite que le protocole utilisé pour les réseaux de capteurs possède des algorithmes d'auto organisation.

Les nœuds dans un réseau de capteurs combinent les données capturées localement, et les communiquent à l'utilisateur. L'utilisateur ne s'intéresse pas à l'envoi d'une requête à un nœud particulier, mais plutôt, à la récupération des informations à partir d'une région ou d'un ensemble de nœuds.

Le réseau de capteur sans fil a pour but de surveiller une zone géographique, et parfois d'agir sur celle-ci (il s'agit alors de réseaux de capteurs-actionneurs). On peut citer comme exemples un réseau détecteur de feu de forêt, ou un réseau de surveillance de la solidité d'un pont après un tremblement de terre. Le réseau peut comporter un grand nombre de nœuds (des milliers) [5] [9].

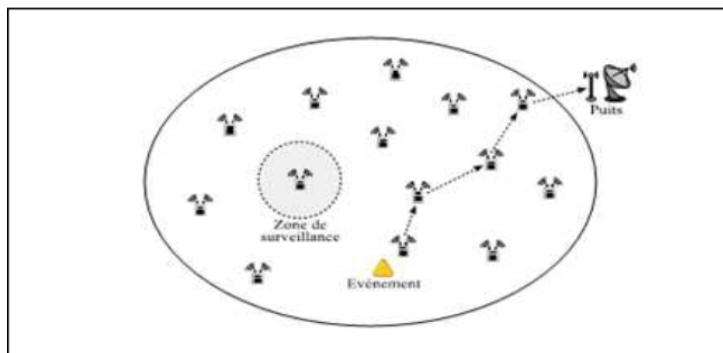


FIGURE 1.2 – Exemple De Réseau De Capteurs

### 1.4.2 Comparaison entre réseau de capteurs et réseau ad-hoc

Le tableau suivant résume les similitudes et les différences entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc ordinaires [19]

Réseau de capteurs sans fil	Réseau MANET
Utilisation d'un médium sans fil	Utilisation d'un médium sans fil
Déploiement Ad Hoc	Déploiement Ad Hoc
Robuste aux pannes des nœuds (Auto-organisation)	Robuste aux pannes des nœuds (Auto-organisation)
Routage multi-saut	Routage multi-saut
La mobilité des nœuds est restreinte	Mobilité des nœuds
Grand nombre de nœuds (de l'ordre de mille)	Nombre de nœud moyen (de l'ordre de cents)
Des petits nœuds plus susceptibles aux pannes, avec moins capacité de traitements et de stockage	Des nœuds ayant plus de capacité de traitements et de stockage
Data-centric : souvent pas d'adresses uniques, les enquêtes sont envoyés à tous les nœuds	Adress-centric : une adresse unique pour chaque nœud utilisée pour réaliser la communication entre les nœuds
Utilisation du broadcast	Communication point à point
Flot de données « Many-to-one »	Flot de données « Any-to-any »
L'énergie est un facteur déterminant	Débit est majeur
Nœuds collaborent pour remplir un objectif commun	Chaque nœud a son propre objectif
Les nœuds agrègent les données avant de les transmettre	Généralement pas d'agrégation de données
Les protocoles de routage doivent prendre en considération certaines contraintes : le grand nombre de nœuds, moins de ressources mémoire et de calcul, la consommation d'énergie	Plusieurs types de protocoles de routage peuvent être utilisés

TABLE 1.1 – Comparaison entre réseau de capteurs et réseau ad-hoc

### 1.4.3 Architecture d'un réseau de capteur sans fil

Un réseau de capteurs consiste en un grand nombre (centaines, des fois milliers) de petits nœuds (capteurs).

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de capture, ces nœuds sont organisés en champs appelé Zone d'intérêt dite « Sensor Fields », chaque nœud a la possibilité de collecter les données et de les router (transférer) vers un point de collecte appelé station de base ou puits dit « SINK en Anglais » du réseau de communication par l'intermédiaire d'une architecture multi-sauts. Le puits transmet ensuite les données capturées à une machine puissante via Internet ou par satellite. En outre, l'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes

au réseau de capteurs [19] [14].

L'architecture d'un réseau de capteurs sans fil est illustrée dans la figure suivante :

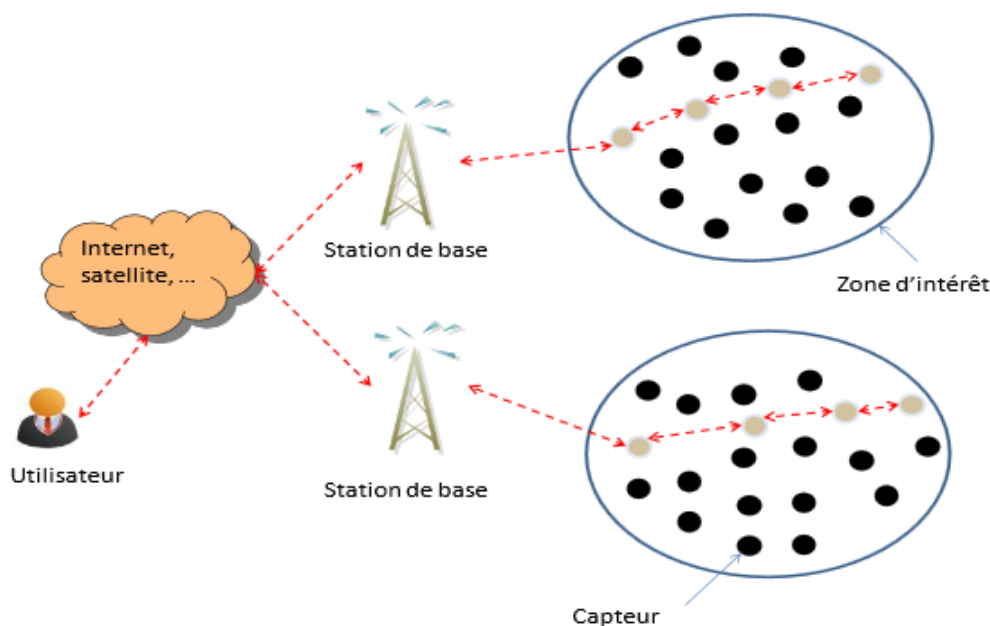


FIGURE 1.3 – Exemple d'une architecture de réseau de capteurs

#### 1.4.4 Types d'architectures des réseaux de capteurs

Il existe deux schémas de configuration des nœuds qui influencent étroitement les protocoles de communication :

- A) Architecture plate ou horizontale : Dans ce type de configuration, tous les nœuds ont un même niveau et peuvent communiquer avec n'importe quel nœud. On peut distinguer deux schémas :
- Centralisé : dans lequel, toutes les données capturées par les nœuds capteurs sont envoyées vers un nœud central qui fait le traitement et la fusion des données pour les transmettre à la station de base. Ce schéma est très simple et il est utilisé seulement pour des réseaux de petite densité [4].
  - Distribué : il est plus compliqué. Plusieurs nœuds de traitement de données existent et peuvent communiquer entre eux [4].
- B) Architecture hiérarchique : Le réseau est découpé en clusters, dans chaque cluster un Cluster-Head est élu pour gérer les communications inter et intra cluster. Toutes les données reçues d'un niveau inférieur sont traitées et agrégées par les cluster-heads de ce niveau avant d'être transmises vers le niveau supérieur [19].

- C) Architecture géographique : Dans certains types d'applications les nœuds peuvent être mobiles et la connaissance de la position géographique des nœuds est nécessaire. Cette position peut être calculée par les méthodes de triangulation ou obtenue par un système GPS (Global Positioning System). Une telle architecture est baptisée *architecture géographique*.

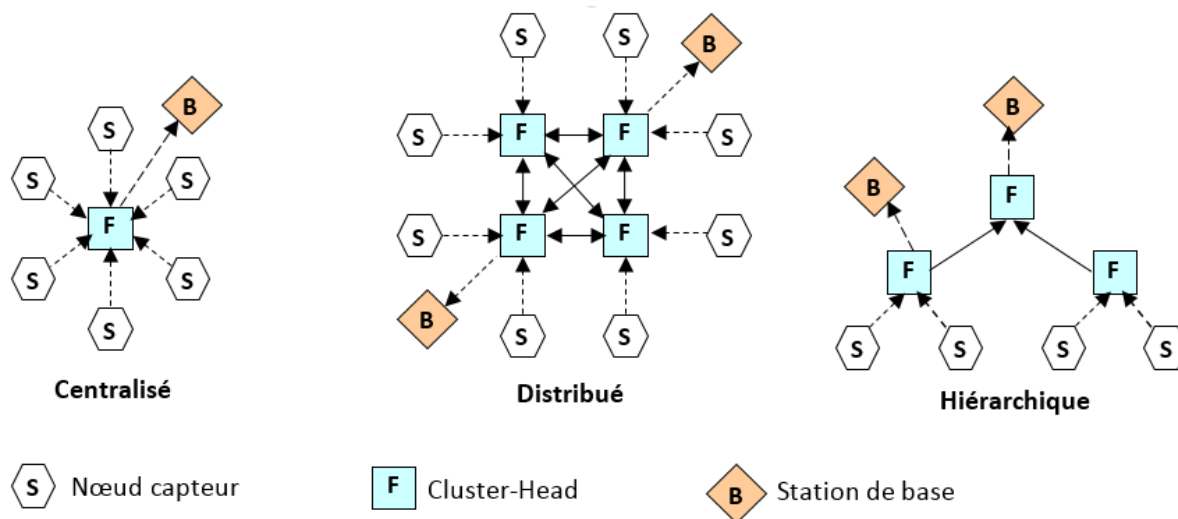


FIGURE 1.4 – Types d'architectures des réseaux de capteurs

### 1.4.5 Architecture d'un nœud capteur

L'architecture d'un capteur comprend deux parties : matériel et système d'exploitation embarqué :

- A) Architecture Matérielle : Un nœud capteur est composé principalement de quatre unités de base : unité de capture, une unité de traitement, une unité de communication et une unité d'énergie ainsi que trois autres composants additionnels sont envisageable selon le domaine d'application, tels qu'un système de localisation, un mobilisateur et un générateur d'énergie.
- Unité de capture : Elle est généralement composée de deux sous-unités : le capteur lui-même et un convertisseur Analogique/Numérique. Le capteur est responsable de fournir des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement [7].
  - Unité de traitement : Cette unité comprend un processeur associé généralement à une petite unité de stockage et fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les micro-capteurs (TinyOS par exemple). Elle est chargée d'exécuter les protocoles de communication qui permettent aux nœuds capteurs de collaborer avec les autres nœuds pour accomplir la requête

en question. Elle peut aussi analyser les données capturées pour alléger la tâche du nœud puits [12].

- **Unité de communication** : Cette unité est responsable d'effectuer toutes les émissions et réceptions des données sur un medium sans fil. Elle peut être de type optique, ou de type radio-fréquence. Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Par conséquent, elles ne peuvent pas établir de liaisons à travers des obstacles. Les unités de transmission de type radio-fréquence comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage ; ce qui implique une augmentation de la complexité et du coût de production du micro-capteur. Concevoir des unités de transmission de type radio-fréquence avec une faible consommation d'énergie est un véritable défi. En effet, pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant. Cependant, l'énergie consommée serait importante. L'autre alternative serait d'utiliser de longues antennes, mais ceci n'est pas possible à cause de la taille réduite des micro-capteurs [7].
- **Unité d'énergie** : Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique (généralement une batterie) pour alimenter tous ses composants. Cependant, en conséquence de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée et généralement irremplaçable. Dès lors, l'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs, puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des micro-capteurs et du réseau en entier.

L'unité de contrôle d'énergie constitue donc l'un des systèmes les plus importants. Elle est responsable de répartir l'énergie disponible aux autres modules et de réduire les dépenses en mettant en veille les composants inactifs par exemple. Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules solaires, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau de capteurs [26] [6].

Le schéma ci-dessous fournit une vue globale d'une architecture typique d'un nœud capteur :

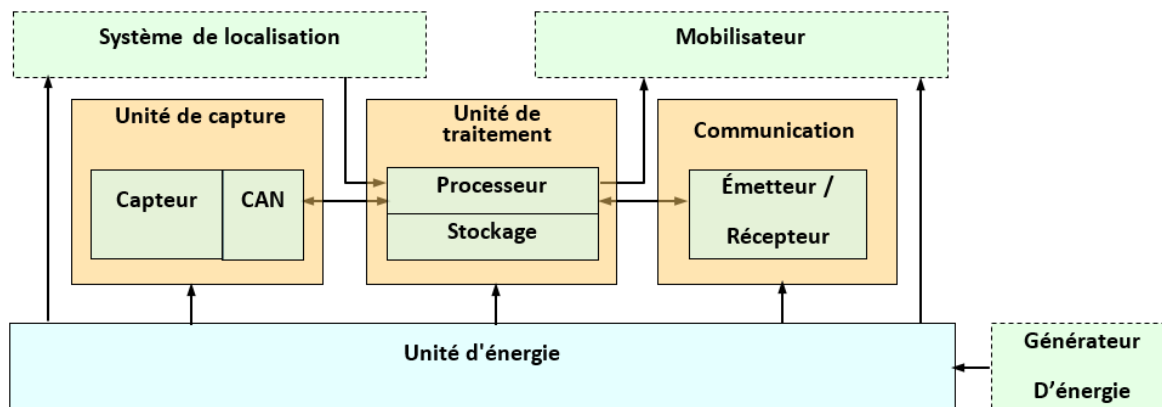


FIGURE 1.5 – les composants d'un capteur

B) Système d'exploitation : Le système d'exploitation (Operating System ou OS) n'est qu'un ensemble de programmes responsables d'assurer l'exploitation des ressources matérielles d'un dispositif par les applications utilisatrices. Les OSs destinés aux réseaux de capteurs sont de petite taille, vue l'espace physiquement limité, mais ils doivent présenter plus de performances en termes de temps d'exécution, occupation de mémoire et en gestion d'énergie. Comme exemple des systèmes d'exploitation les plus répandus pour les réseaux de capteurs : TinyOS et Think.

- Tiny OS : (Tiny Operating System) est un système d'exploitation "open source" pour les réseaux de capteurs conçu par l'université américaine de BERKELEY. Sa conception a été entièrement réalisée en NesC, langage orienté composant syntaxiquement proche du C. Il repose sur :
  - Une architecture basée composant.
  - Un modèle de programmation basé événement.
  - Un modèle de concurrence basé sur des événements et des tâches.
- Think : C'est une implémentation du modèle Fractal en C, il est développé par l'INRIA et France Télécom R&D pour :
  - Créer des systèmes d'exploitation pour les systèmes embarqués.
  - Créer les applications s'exécutant dessus.

Il repose sur une utilisation plus large de l'ingénierie logicielle basée composant (aspect dynamique) et propose une gestion des aspects non fonctionnels via des contrôleurs. Contrairement à TinyOS, il permet l'allocation dynamique de ressources [7] [26].

## 1.4.6 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil

### 1. Énergie limitée

Les RCSF visent la consommation d'énergie puisque l'alimentation de chaque nœud est assurée par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable à cause de l'environnement hostile où il est déployé. De ce fait, la durée de vie d'un RCSF dépend fortement de la conservation d'énergie au niveau de chaque nœud [5].

### 2. Ressources limités

À cause de la miniaturisation des composants électroniques, les performances des nœuds capteurs sont limitées. Par conséquent, les nœuds capteurs collaborent en traitant partiellement les mesures captées et envoient seulement les résultats à l'utilisateur. Une autre conséquence, ces limitations imposent des portées de transmission réduites contraignant les informations à être relayées [5].

### 3. Densité et déploiement des nœuds

Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un nombre très important de nœuds pour garantir une couverture totale de la zone à surveiller, de plus, si plusieurs nœuds capteurs se retrouvent dans une région, un nœud défaillant pourra être remplacé par un autre. Cependant, la densité de déploiement donne naissance à des challenges pour la communication entre les nœuds. En effet, elle provoque des collisions ou des endommagements des paquets transmis [5] [15].

### 4. Modèle de communication

Les nœuds dans les RCSF communiquent selon un paradigme plusieurs à un (many to one). En effet, les nœuds capteurs collectent des informations à partir de leur environnement et les envoient toutes vers un seul nœud qui représente le centre de traitement [5].

### 5. Tolérance de fautes

Le réseau doit être capable de maintenir ses fonctionnalités sans interruptions en cas de défaillance d'un ou plusieurs de ses capteurs. Cette défaillance peut être causée par une perte d'énergie, ou par dommage physique ou interférence de l'environnement [14].

### 6. Absence d'adressage fixe

Les nœuds dans les réseaux sans fil classiques sont identifiés par des adresses IP. Cependant, cette notion n'existe pas dans les RCSF. En effet, les requêtes des utilisateurs ne sont pas généralement destinées à un seul nœud, mais plutôt, à un ensemble de nœuds identifiés [5].

## 7. Auto-organisation

L'auto organisation s'avère très nécessaire pour ce type de réseau afin de garantir sa maintenance. Vu les différentes raisons résultant une topologie instable du réseau de capteur, ce dernier devra être capable de s'auto organiser pour continuer ses applications [14].

## 8. Sécurité limité

A l'instar des réseaux ad hoc, les réseaux de capteurs sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par l'autonomie limitée et la miniaturisation des capteurs qui par conséquent ont une puissance de calcul limitée, ce qui empêche l'utilisation de mécanisme cryptographique résistant comme la cryptographie à clé publique, ajouté à cela le déploiement de ces capteurs dans des environnements hostiles les expose un danger qui tend vers la falsification de l'information. En effet, les nœuds eux-mêmes sont des points de vulnérabilité du réseau car ils peuvent être modifiés, remplacés ou supprimés [18].

### 1.4.7 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil

#### 1. Application militaire

Comme pour de nombreuses autres technologies, le domaine militaire a été le moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs [5]. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Actuellement, les RCSFs peuvent être une partie intégrante dans le commandement, le contrôle, la communication, la surveillance, la reconnaissance, etc [10].

#### 2. Applications médicales

Les réseaux de capteurs sont également largement répandus dans le domaine médical. Cette classe inclut des applications comme : fournir une interface d'aide pour les handicapés, collecter des informations physiologiques humaines de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de certaines maladies, surveiller en permanence les malades et les médecins à l'intérieur de l'hôpital [10].

#### 3. Applications environnementales

Dans ce domaine, les capteurs peuvent être exploités pour détecter les catastrophes naturelles (feux de forêts, tremblements de terre, etc.), des produits toxiques (gaz, produits chimiques, pétrole, etc.) dans des sites industriels tels que les centrales nucléaires et pétrolières [10].

#### 4. Applications commerciales

Parmi les domaines dans lesquels les réseaux de capteurs ont aussi prouvé leur utilité, on trouve le domaine commercial. Dans ce secteur on peut énumérer plusieurs applications comme : la surveillance de l'état du matériel, le contrôle et l'automatisation des processus d'usinage, etc [23].



## 5. Applications lié à la sécurité

Les altérations dans la structure d'un bâtiment, suite à un séisme ou à un vieillissement, peuvent être détectées par des capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton. Un RCSF de mouvements peut constituer un système d'alarme distribué qui sert à détecter les intrusions sur un large secteur [5].

### 1.4.8 Types d'applications des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil ont été classés parmi les technologies les plus importantes du 21<sup>ème</sup> siècle. En effet, la recherche dans le domaine des capteurs est en train de vivre une révolution importante, ouvrant des perspectives d'impacts significatifs dans de nombreux domaines. Ainsi, nous classifions les applications des RCSF en quatre classes d'applications : orientées temps, orientées événements, orientées requêtes et hybride [8].

#### 1. Applications orientées temps

Cette classe représente les applications où l'acquisition et la transmission des données capturées sont liées au temps : instant précis, période d'acquisition. Cette période d'acquisition peut être plus au moins longue selon l'application (de quelques secondes jusqu'à quelques heures voire des jours). Ainsi, la quantité de données échangée dans le réseau dépend de la périodicité des mesures à effectuer sur l'environnement local. La collecte de données environnementales peut représenter un bon exemple de cette classe d'application dans des domaines variés : agriculture, expérimentation scientifique, etc [8].

#### 2. Applications orientées événements

Dans ce cas, les capteurs envoient leurs données seulement si un événement spécifique se produit. On peut citer l'exemple de surveillance des feux dans les forêts où un capteur envoie des alarmes à la station de base dès que la température dépasse un certain seuil. Au départ, cette classe d'application était conçue à des fins militaires, comme la surveillance du déplacement d'objets dans le champ de bataille. Par la suite, cette classe a rapidement trouvé de nouvelles perspectives comme le contrôle industriel, le contrôle médical des patients, la surveillance d'édifices (barages, ponts, voies de chemins de fer, etc) [24].

#### 3. Applications orientées requêtes

Dans ce cas, un capteur envoie de l'information uniquement suite à une demande explicite de la station de base. Cette classe d'application est destinée aux applications adaptées à l'utilisateur. Ce dernier peut requérir des informations à partir de certaines régions dans le réseau ou interroger les capteurs pour acquérir des mesures d'intérêts. Dans ce cas, des connaissances sur la topologie du réseau et l'emplacement des capteurs sont nécessaires [8].

#### 4. Applications hybrides

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

données par événements (event driven). Par exemple, pendant les longues périodes d'inactivité des capteurs et lorsque aucun objet n'est présent, le réseau peut assurer une fonction de surveillance [24].

## 1.4.9 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil

### 1. Pile protocolaire (modèle en couches)

Par analogie au modèle OSI (Open Système Interconnexion) des réseaux filaires, le modèle de communication utilisé dans les réseaux de capteurs comprend cinq couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI.

Comme la communication n'est pas le seul souci dans les réseaux de capteurs, il y a d'autres critères très importants qu'il faut tenir en compte. De ce fait, d'autres couches supplémentaires sont ajoutées pour gérer l'énergie, la mobilité des nœuds et l'ordonnement des tâches.

Le rôle et les caractéristiques des couches : application, transport, réseau, liaison de données, physique et les niveaux intégrés : plan de gestion d'énergie, plan de gestion de mobilité et le plan de gestion de tâche (voir la figure ci-dessous) sont résumés dans le paragraphe suivant [18].

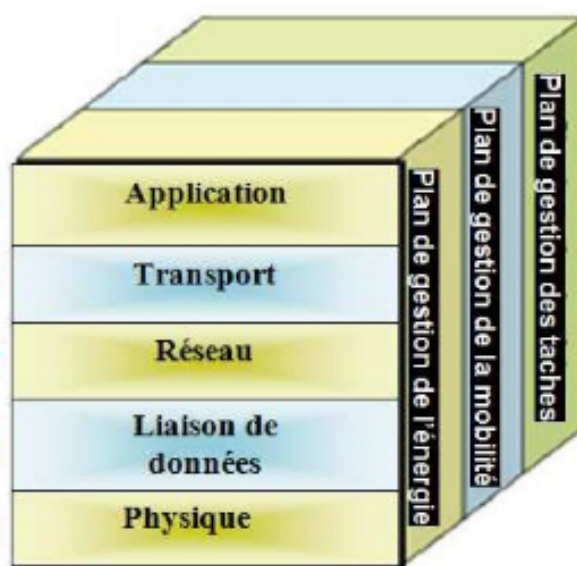


FIGURE 1.6 – Pile protocolaire

#### Couche application :

Suivant la fonctionnalité des capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et implémentées sur cette couche. Elle fournit des mécanismes pour permettre à l'utilisateur d'interagir avec le réseau en lui fournissant des interfaces pour la création et la diffusion des requêtes et un moyen d'interpréter les réponses reçues [18].

**Couche transport :**

Cette couche constitue une interface entre la couche application et la couche réseau. Elle est responsable : du transport de données, leur découpage en paquets, contrôle de flux [18].

**Couche réseau :**

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont dispersés à forte densité pour observer un phénomène dans une région. Par conséquent, ils sont très proches les uns des autres. Pour assurer la propagation du signal sans effets de dégradation, les réseaux de capteurs utilisent une communication multi sauts. De plus, les nœuds doivent consommer moins d'énergie pour acheminer les données capturées dans le réseau au nœud puits, ce qui rend l'utilisation des protocoles de communication traditionnels des réseaux Ad hoc impraticables. Par ailleurs d'autres caractéristiques peuvent être citées afin d'illustrer le besoin de nouveaux protocoles de routage pour les réseaux de capteurs :

- Il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global vu le grand nombre de nœuds capteurs.
- Les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement des données mesurées par de multiples sources à un nœud puits particulier.
- Les multiples capteurs peuvent produire les mêmes données à proximité d'un phénomène (redondance des données captées due à la forte densité de déploiement).

Les capteurs exigent une gestion soigneuse des ressources disponibles à savoir : la puissance de transmission, énergie de la batterie, ainsi que la puissance de traitement et stockage [18].

**Couche liaison de données :**

La couche liaison est à la charge du multiplexage de données, détection des trames, la gestion de l'accès au support de communication et le contrôle d'erreurs. Elle assure la fiabilité de la communication point à point et multipoint. Cependant, les protocoles MAC (Media Access Control) conventionnels ne sont pas directement applicables dans les réseaux de capteurs. Cette couche exige l'utilisation de protocoles qui doivent être capables de réduire au minimum la collision avec l'émission des voisins et de minimiser les retransmissions [18].

**Couche physique :**

Dans cette couche les besoins d'une modulation simple et robuste à motiver l'utilisation des techniques de transmission et de réception de données afin d'assurer la sélection des fréquences, la génération des porteuses et le cryptage des différentes données. De manière générale, le choix d'un bon schéma de modulation est critique et dépend du système utilisé [18].

## 1.5 Conclusion

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

Les différentes utilisations possibles de ces réseaux démontrent la diversité de leurs applications. En effet, les applications des réseaux de capteurs sont fortement dépendantes du domaine et des objectifs envisagés. A chaque application correspond une architecture du réseau et une implémentation. Ainsi, le déploiement de telle infrastructure ou topologie, à la fois dynamique et configurable pose de grands défis auxquels il faut répondre. Par exemple la durée de vie limitée de la batterie du capteur, où chaque nœud est alimenté par une source d'énergie généralement irremplaçable et limitée, pose un grand problème sur la durée de vie totale du réseau en entier. Pour cela, beaucoup de chercheurs essayent d'intégrer des mécanismes qui permettent de prolonger la durée de vie du réseau. Ils consacrent une grande importance à la conservation d'énergie de la communication qui est la plus gourmande dans ce type de réseaux, et alors ils développent par la suite des protocoles de routage appropriés.

Ce premier chapitre, a été consacré pour la présentation des réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication ainsi que la pile protocolaire des capteurs et leurs diverses applications. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs facteurs et contraintes compliquent la gestion de ce type de réseaux.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude détaillée du concept d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil ainsi que les techniques utilisées pour sa conservation, et aussi pour présenter des protocoles de routages à contrainte énergétique déployés pour ces réseaux.

## Chapitre 2

# Les protocoles de Routage des réseaux de capteurs sans fil

## 2.1 Introduction

Bien qu'un grand nombre d'applications mettent en jeu des RCSFs, ceux-ci ont plusieurs restrictions que ces applications doivent contourner. Par exemple, ils ont une faible puissance de calcul, une réserve d'énergie limitée et une bande passante réduite aux connexions sans fil entre capteurs. Un des principaux objectifs dans la conception des RCSFs est la transmission fiable de données via une heuristique de préservation d'énergie et de prévention de perte de connectivité (exp. aucun nœud isolé). Ceci est fait par l'utilisation d'une politique stricte de gestion d'énergie. En effet, la principale source de consommation d'énergie d'un capteur est l'utilisation du réseau sans fil via son module de radiocommunication [26].

Le routage désigne le mécanisme par lequel les données d'un équipement expéditeur sont acheminées jusqu'à leur destinataire, même si aucun des deux ne connaît le chemin complet que les données devront suivre. Le développement des protocoles de routage spécifiques aux réseaux de capteurs a attiré une grande part d'intention parmi les chercheurs dans le domaine. Ceci car, d'une part, ces protocoles peuvent varier suivant les différentes approches de routage, et d'autre part, les solutions de routage proposées dans le cas des réseaux ad hoc ne sont pas applicables directement dans les réseaux de capteurs, et sans le routage la communication sur n'importe quel réseau serait impossible. Bien que l'objectif principal reste le même, c'est à dire qu'il s'agit de trouver la façon la plus simple d'acheminer des paquets de données d'une source à une destination, le routage dans les réseaux de capteurs tolère une certaine négligence des paramètres de qualité de service en ne tenant compte que de la minimisation de la consommation d'énergie. En effet, une problématique majeure dans les réseaux de capteurs est la maîtrise de l'énergie consommée par chaque nœud capteur. Les nœuds capteurs sont alimentés par une batterie dont la capacité est limitée et qui n'est pas rechargeable.

Aussi, pour qu'un réseau de capteurs ait une longévité maximale, il faut que la consommation d'énergie soit prise en compte à tous les niveaux de l'architecture réseau. Comme les protocoles mis en œuvre doivent en particulier intégrer cette contrainte, beaucoup de travaux dans le domaine des réseaux de capteurs ont proposé de nouveaux protocoles de communication (contrôle de l'accès au médium de communication, routage, etc.) [19].

Dans ce chapitre nous allons présenter en premier lieu le routage à consommation d'énergie minimale dans les réseaux de capteurs puis décrire les protocoles de routage pour un réseau de capteurs sans fil.

## 2.2 Routage à consommation d'énergie minimale dans les réseaux de capteurs

Dans les réseaux de capteurs, le routage est plus important en tant que son succès et efficacité pour conserver l'énergie et les ressources dans le réseau entier. En fait, le rôle de routage dans les réseaux de capteurs est défini comme l'optimisation de consommation d'énergie de façon à maximiser la durée de vie du réseau [26].

### 2.2.1 Route à énergie disponible maximum

Le choix des routes efficaces en consommation d'énergie consiste à prendre celle qui contient les nœuds possédant le maximum d'énergie totale disponible. Cette quantité est égale à la somme des énergies résiduelles des nœuds appartenant à cette route [26].

### 2.2.2 Route à énergie de transmission minimale

Le choix se fait sur la route qui consomme le minimum d'énergie pour transmettre un paquet entre le nœud capteur et le nœud puits [26].

### 2.2.3 Route a nombre de sauts minimum

La route sélectionnée est celle qui traverse un nombre minimum de nœuds intermédiaires pour atteindre le nœud puits [26].

### 2.2.4 Route a nœud ayant le maximum de minimum des énergies disponible

Le choix se fait sur la route dans laquelle l'énergie disponible minimale est plus grande que toutes les autres énergies minimales disponibles des autres routes [26].

## 2.3 Protocoles de routage pour un réseau de capteurs sans fil

Le routage désigne le mécanisme par lequel les données d'un équipement expéditeur sont acheminées jusqu'à leur destinataire, même si aucun des deux ne connaît le chemin complet que les données devront suivre. Ce mécanisme est très important dans tous les réseaux. Sans routage, la communication sur n'importe quel réseau serait impossible. Le routage dans les réseaux de capteurs a une importance capitale car son efficacité tant à conserver l'énergie et les ressources dans le réseau entier. De ce fait maximiser la durée de vie du réseau.

Les protocoles de routage proposé pour les réseaux de capteurs peuvent être classés selon trois grandes catégories : protocole de routage basé sur la structure du réseau, protocole de routage basé sur l'initiateur de la communication et les protocoles de routage basé sur le fonctionnement des protocoles.

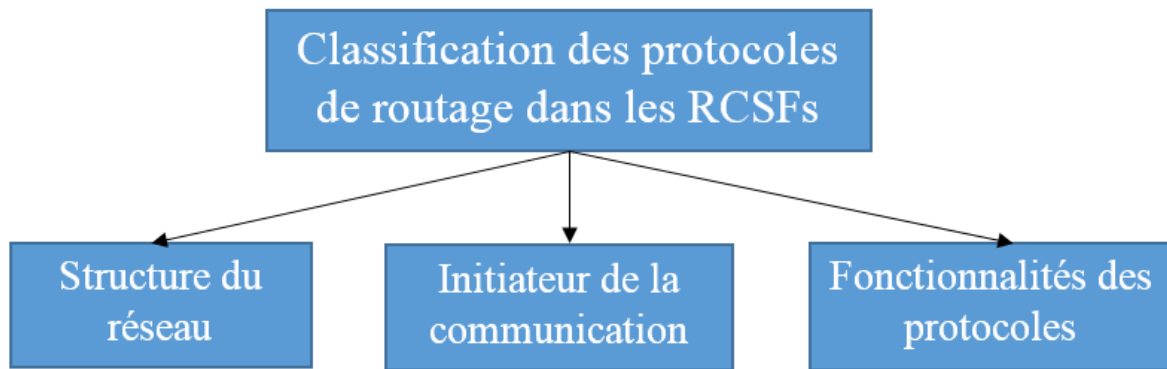


FIGURE 2.1 – Classe des protocoles de routage dans les RCSFs

### 2.3.1 Protocoles de routage basés sur la structure du réseau

Les protocoles de routage basés sur la structure du réseau peuvent être classifiés en trois catégories : protocoles à plat, protocoles hiérarchiques et protocoles basés sur la localisation géographique.

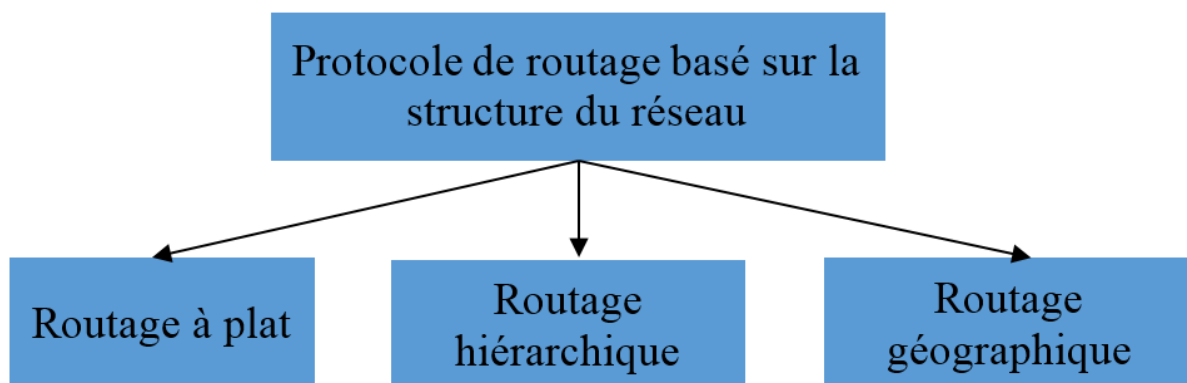


FIGURE 2.2 – Protocole de routage basé sur la structure du réseau

#### a. Routage à plat

Dans cette topologie, tous les nœuds sont considérés homogènes et communiquent entre eux sans aucun autre intermédiaire, et seul le nœud puits est chargé de la collecte de données issues des différents nœuds capteurs afin de les transmettre vers les centres de traitement. Au cas où la destination ne fait pas partie du voisinage de la source, les données seront transmises en utilisant des sauts multiples.

Les topologies plates sont caractérisées par la simplicité des algorithmes exécutés par les protocoles de routage, et comme les RCSF souffrent des changements brusques de la topologie, une organisation plate permet la possibilité de construire différents chemins des sources vers le nœud puits.

Cependant, les réseaux plats présentent des inconvénients comme celui défini par le problème de points chauds. En effet, tous les nœuds sont homogènes et il n'y a que le nœud puits qui est chargé de la récolte d'informations, et ces dernières passent forcément par les nœuds qui entourent le nœud puits et qui seront de ce fait épuisés. Par ailleurs,



les nœuds doivent accomplir plusieurs tâches en même temps ce qui pourrait rapidement épuiser leurs ressources énergétiques et dégrader ainsi les performances du réseau [5].

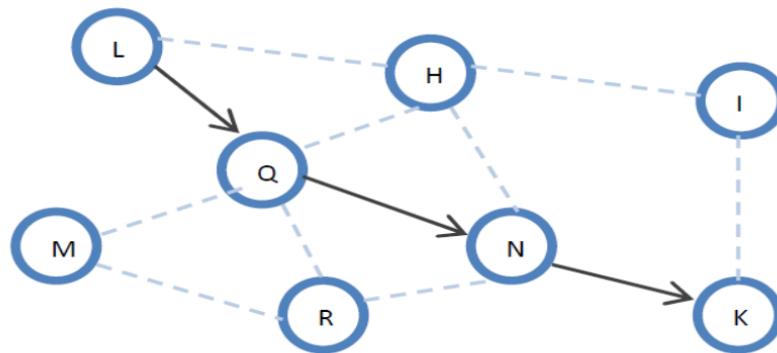


FIGURE 2.3 – Routage à Plat

Plusieurs protocoles rentrent dans cette catégorie comme :

- La diffusion dirigée (DD) La diffusion dirigée ou est basé sur la donnée centré. L'idée principale de ce paradigme<sup>1</sup> est de combiner les données venant de différentes sources, éliminer les redondances et minimiser le nombre de transmissions afin de conserver l'énergie du réseau [26].
- Flooding.
- Le protocole SPIN (Sensors Protocols for Information via Negotiation).

## b. Routage hiérarchique

Dans cette architecture, il y a la notion de cluster Le réseau est subdivisé en clusters et chaque cluster est constitué de nœuds simples et d'un cluster-head. Seul le cluster-head (appelé aussi nœud leader ou encore nœud chef) communique avec les autres nœuds ou avec la station de base. Tous les nœuds d'un cluster envoient les données au cluster-head [29].

### Avantages

Dans cette classe, on trouve la consommation efficace de l'énergie et la scalabilité comme avantages. Les cluster-heads sont soit des super nœuds (des nœuds plus puissants comparés aux nœuds simples, c.-à-d. qu'ils possèdent un processeur plus puissant une mémoire plus importante et des ressources d'énergie plus importantes) ou alors ils sont élus périodiquement suivant leur quantité d'énergie restante (le nœud dont la quantité d'énergie restante est plus importante est élu cluster-head). Le cluster-heads est le nœud responsable de la coordination des activités à l'intérieur du cluster et de la dissémination de l'information entre les clusters vers la station de base [29].

---

1. modèle

Inconvénients

- Les nœuds élus comme des cluster-heads consomment plus d'énergie que les autres nœuds dans le réseau. Si les cluster-heads ne changent pas régulièrement, le réseau va être partitionné, c'est à dire le découpage du réseau en secteurs.
- La condition physique : plusieurs protocoles exigent que les nœuds cluster-heads aient des ressources énergétiques plus élevées que les autres nœuds dans le réseau.
- La complexité : si les nœuds cluster-heads ont la même capacité que les autres nœuds dans le réseau, donc, la méthode utilisée pour faire le routage et le choix des cluster-heads doit prendre en considération la contrainte de consommation d'énergie d'une manière équitable. Cela va augmenter le nombre des messages consommant l'énergie dans le réseau.
- Non scalable : les protocoles hiérarchiques ne sont pas scalables puisque le nombre des cluster-heads augmente quand la taille du réseau augmente. Et par conséquent, le nombre des messages overhead augmente lors de l'établissement de ces cluster-heads.

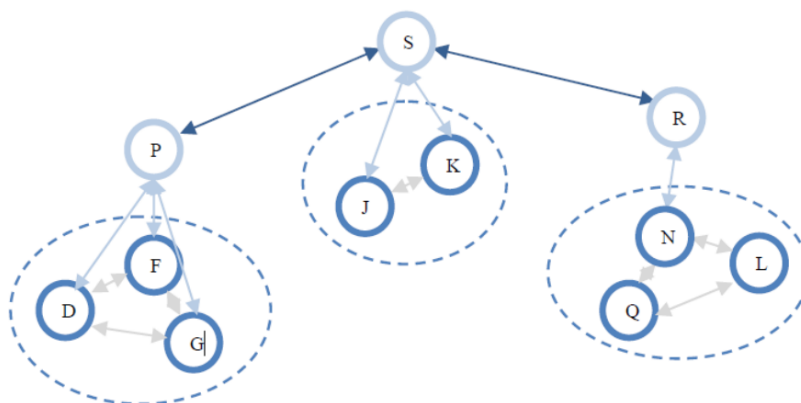


FIGURE 2.4 – Routage hiérarchique

Exemple de protocole de routage hiérarchique :

- Protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) : Il est basé sur une structure distribuée de cluster dans laquelle un représentant de cluster (CH : Cluster-Head) est choisi aléatoirement. LEACH fusionne les données dans le protocole de routage afin de réduire la quantité d'informations transmis vers la station de base. Il utilise aussi le protocole TDMA/CDMA pour réduire les collisions inter et intra-cluster.
- Protocole PEGASIS (Power Efficient GATHERing in Sensor Information Systems)
- Protocole TEEN (Threshold-sensitive Energy-Efficient sensor Network)

### c. Routage géographique

Dans ce type de routage, les nœuds capteurs sont adressés en fonction de leurs localisations. La distance entre les nœuds voisins peut être estimée sur la base des forces entrantes de signal. Des coordonnées relatives des nœuds voisins peuvent être obtenues en échangeant une telle information entre les voisins. Alternativement, la location des nœuds peut être disponible directement en communiquant avec un satellite en utilisant GPS (système de positionnement global).

Dans la plupart des protocoles de routage, l'information sur la localisation des nœuds est nécessaire afin de calculer la distance entre deux nœuds particuliers de sorte que la consommation d'énergie puisse être estimée [26] [7].

#### Avantages :

- L'utilisation des GPSs permet d'améliorer la connaissance de la position au centimètre près. Des traitements du signal dans des récepteurs plus sophistiqués permettent d'améliorer la précision de positionnement (résolution de la distance).
- Dans le routage basé sur la localisation géographique, la région de sensation est connue et la requête peut être donc dirigée uniquement vers cette région, ce qui éliminera le nombre de transmission de manière significative.

#### Inconvénients

- Les nœuds doivent être équipés d'un système de localisation par satellite.
- Le routage basé sur la localisation géographique n'est pas un bon choix pour les applications qui exigent une livraison fiable à des intervalles réguliers des paquets de données.

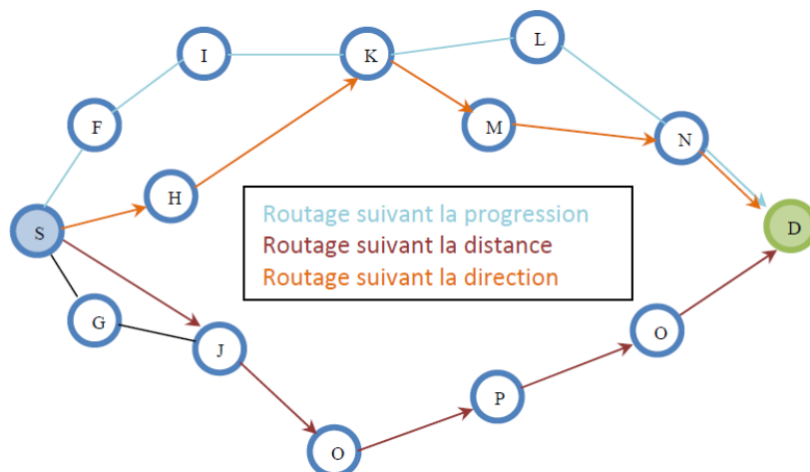


FIGURE 2.5 – Routage géographique

Exemple de protocoles géographique :

- Protocole GEAR (Geographic and Energy Aware Routing) : celui-ci utilise une sélection heuristique basé sur des informations géographique sur les nœuds voisins pour router les paquets au destinataire. L'idée de base est de restreindre le nombre de requête en considérant seulement certaine régions plutôt que les diffuser dans le réseau entier.
- Protocole GAF (Geographic Adaptive Fidelity)

### 2.3.2 Protocoles basés sur l'initiateur de communication

La communication dans un réseau de capteurs peut être initiée par un nœud source ou un nœud destination.

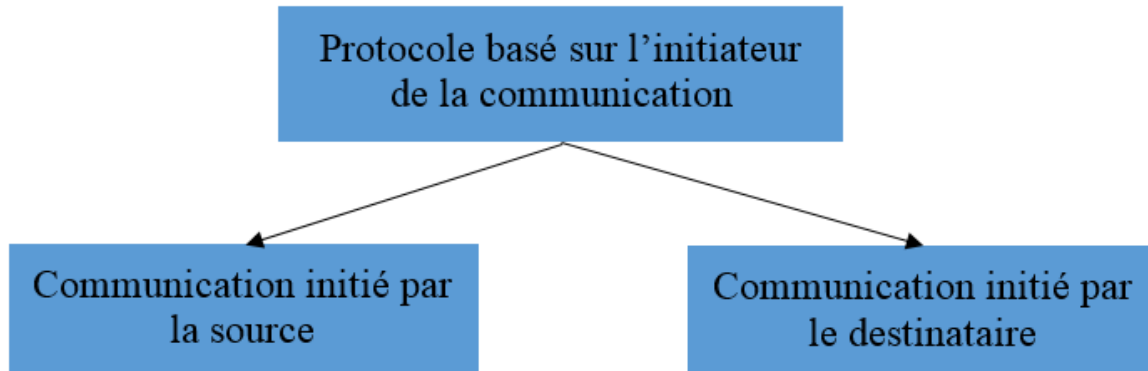


FIGURE 2.6 – Protocole basé sur l'initiateur de la communication

#### a. Communication lancée par la source

Dans un protocole où la communication est initiée par un nœud source : les nœuds envoient des données à la station de base quand ils détectent une variation sensible des paramètres à surveiller. Ces protocoles utilisent des modèles de livraison de donnée dirigés par les événements ou dirigés par le temps (périodiques). Soit la donnée est envoyée à intervalle de temps régulier ou alors elle est envoyée quand les nœuds capturent une certaine valeur lors de la détection d'un événement [29].

#### b. Communication lancée par la destination

Les protocoles où la communication est initiée par les destinations, utilisent un modèle de livraison de donnée basé sur les requêtes. Les nœuds sources répondent aux requêtes envoyées par la station de base. Il y a un surcoût dans ce type de protocoles puisque les requêtes sont d'abord diffusées dans tout le réseau. Donc, à chaque fois qu'il ya une requête il y a un flooding de tout le réseau (inondation de tout le réseau) [29].

### 2.3.3 Routage basés sur le fonctionnement des protocoles

On distingue quatre types de protocoles : multi-chemin, basé sur la qualité de service (QoS), basé sur la négociation, basé sur le flux de donnée.

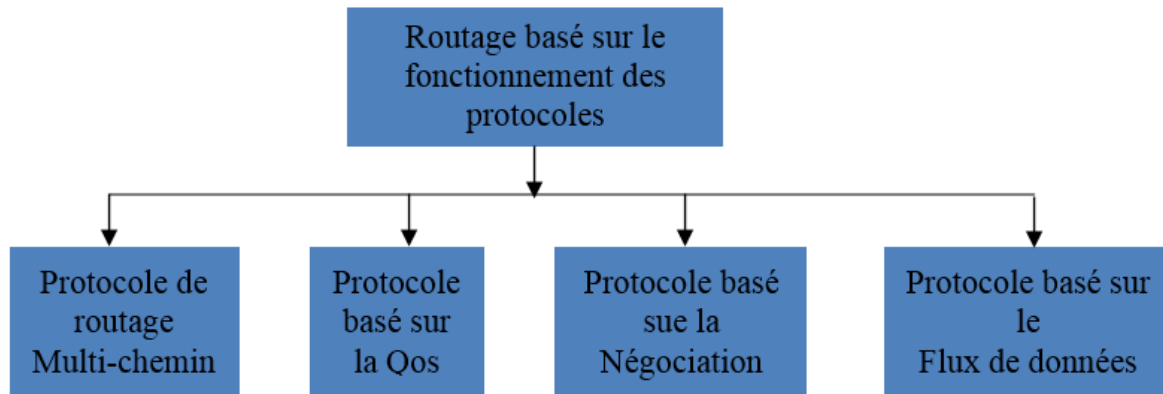


FIGURE 2.7 – Routage basé sur le fonctionnement des protocoles

### a. Routage basé sur la qualité de service (QoS)

Dans cette famille de protocoles le réseau bascule entre l'énergie et la qualité des données transmises. En particulier, le réseau satisfait certaines métriques de QoS comme les délais, l'énergie, la bande passante, ...etc [26].

#### Avantages :

- La prise en compte des délais de transmissions rend les protocoles de cette approche très recommandés à des applications de surveillance (centres nucléaires, monitoring médical, applications militaires, etc).
- La qualité des liaisons dans la communication assure la fiabilité des transmissions.
- Augmentation du taux d'arrivée des paquets au nœud puits.

#### Inconvénients :

- L'approche doit prendre en considération la contrainte d'énergie en parallèle avec les critères de la QoS.

Exemple de protocole basé sur QoS :

- Le protocole SPEED : est un protocole basé sur la qualité de service, celui-ci essaye en outre d'assurer une certaine rapidité à chaque paquet dans le réseau et d'éviter l'encombrement qui peut se produire dans le réseau.
- Le protocole SAR (sequential assignment routing)

### b. Routage basé sur la négociation de données

Ces protocoles utilisent des descripteurs de données de haut niveau et des messages de négociation afin d'éliminer la transmission de données redondantes [26].

#### Avantages :

- Le mécanisme de négociation utilisé permet de réduire le taux de données redondantes transmises.

- La négociation entre les nœuds permet à eux de prendre des décisions adéquates suivant leurs ressources énergétiques disponibles.

#### Inconvénients :

- L'échange de messages de contrôle entre les nœuds cause la congestion du réseau ainsi qu'une perte additionnelle d'énergie.
- Le scénario de négociation entre les nœuds (déterminer les données et les acheminer) produit un retard pour délivrer les données aux nœuds puits.

Exemple de protocole basé sur la négociation :

- La famille des protocoles SPIN

### **c. Routage multi-chemins**

Au lieu d'utiliser un seul chemin, les protocoles maintiennent plusieurs routes afin d'augmenter les performances du réseau. La résistance 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. Cela peut être garanti en maintenant plusieurs chemins ne consommant pas beaucoup d'énergie et en les laissant actifs par l'envoi de messages périodiques [26].

#### Avantages :

- 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 nœuds intermédiaires (énergie) et le débit sur les liens.
- L'augmentation de la fiabilité et de la robustesse par la possibilité d'existence de plusieurs routes entre la source et la destination.

#### Inconvénients :

- Les chemins alternatifs sont maintenus en vie par l'envoi de messages périodiques. Par conséquent, un overhead et une perte additionnelle d'énergie viennent s'ajouter pour maintenir ces chemins alternatifs.
- Le risque de perte des paquets augmente dans le cas où ces derniers sont envoyés sur des chemins ayant des nœuds communs qui peuvent tomber en panne.

### **d. Routage basé sur le flux de données dans le réseau**

Dans le routage à contrôle de flux, le flux représente les routes empruntées par les paquets, le problème du routage est formulé en programmation linéaire avec pour objectif de trouver le flux de données qui maximise la durée de vie du réseau [26].

#### Avantages

- L'adaptation du trafic aux capacités énergétiques des liens et des capteurs.

- La durée de vie du réseau est présentée comme une fonction générale de tous les nœuds, dont l'objectif est de maximiser les durées de vie élémentaires des capteurs ainsi que la capacité du réseau.
- Répartition du trafic de façon à assurer l'équité en consommation d'énergie entre les nœuds.

### Inconvénients

- Des informations sur la topologie du réseau sont indispensables, ce qui n'est pas adapté aux RCSFs à grande échelle.
- Cette approche est valable pour les RCSFs à des topologies spécifiques (par exemple : un seul nœud origine).
- La majorité des algorithmes de cette approche supposent que le taux de génération des données est connu ou bien constant. Par contre, ce taux peut se changer avec le temps.

Exemple de routage a flux de données :

- L'algorithme de routage max-min  $zP_{min}$  : cette algorithme vise à combiner deux objectifs, le premier consiste à calculer le chemin qui consomme le moins d'énergie possible, le deuxième consiste à trouver le chemin qui maximise le minimum d'énergie résiduelle dans le réseau.

## 2.4 Conclusion

Le routage dans les réseaux de capteurs est un problème complexe, ceci est dû d'une part, à ces protocoles qui peuvent varier suivant les différentes approches de routage, et d'autre part, les solutions proposées dans les réseaux ad hoc ne sont pas applicable directement dans les réseaux de capteurs.

Dans ce chapitre, on a vu plusieurs protocoles proposés pour les réseaux de capteurs sans fil, ils ont été classifiés selon plusieurs critères qui sont : la structure du réseau, l'initiateur de communication, le fonctionnement des protocoles.

Le chapitre suivant sera consacré sur un nouveau type de routage appelé le routage opportuniste ainsi que les classes de ce dernier et les différents protocoles existant dans le routage opportuniste.

## Chapitre 3

# Le routage opportuniste dans les RCSFs



## 3.1 Introduction

Le routage est crucial aussi bien dans les réseaux ad hoc sans fil que dans les réseaux de capteurs. Les tâches du routage incluent le choix d'itinéraire et l'expédition de paquets. Le choix d'itinéraire se base sur un ou plusieurs itinéraires reliant une paire de nœuds. L'expédition de paquets prend une décision d'un capteur sur laquelle le voisin devrait être choisi pour expédier un paquet le long des itinéraires choisis. La nature fortement dynamique et les pertes dans le milieu sans fil font du routage dans les réseaux sans fil un problème provocant.

Les protocoles de routage traditionnels pour les réseaux sans fil exécutent le meilleur chemin qui pré-sélectionne un ou plusieurs itinéraires fixes optimisés avant que les transmissions commencent et utilise un voisin fixe pour l'expédition d'un paquet dans chaque capteur.

Cette stratégie ne s'adapte pas bien à l'environnement sans fil dynamique où les échecs de transmission se produisent fréquemment et qui déclencheraient les retransmissions Link-level excessives de ce fait le gaspillage des ressources ou même la panne du système.

Récemment, le Routage Opportuniste (RO) est un sujet d'actualité, il a reçu beaucoup d'attention et de recherches, car il est considéré comme une direction prometteuse pour améliorer l'exécution des réseaux de capteurs sans fil. L'idée principale derrière le routage opportuniste est de surmonter l'inconvénient de la transmission sans fil incertaine en tirant profit de la nature d'émission du milieu sans fil tels qu'une transmission surprise par des voisins multiples [20].

Dans ce chapitre, nous illustrons d'abord l'idée fondamentale derrière le RO, et listons ensuite les composants du RO, les métriques de routage opportuniste, la classification de quelques protocoles de RO. En conclusion, nous rédigeons un tableau de comparaison entre différents protocoles en se basant sur différentes métriques.

## 3.2 Notion de routage opportuniste

Le routage opportuniste est thème d'actualité dans les RCSFs, vu que c'est une nouvelle approche dans le routage de données, il suscite beaucoup d'intérêt pour la recherche dans le domaine des RCSFs.

### 3.2.1 Définition

Le routage opportuniste est un nouveau mécanisme de routage pour les RCSFs. Contrairement au routage traditionnel, où on sélectionne le prochain voisin avant la transmission ce qui implique des problèmes de réception si les liaisons sont soumises à des erreurs, le routage opportuniste exploite la diffusion qui existe dans les réseaux sans fil tel que chaque nœud qui arrive à surprendre un paquet et soit proche de la destination est apte à participer dans l'envoi des paquets reçus [11].

Autrement dit, le routage opportuniste est une approche permettant de prendre en compte l'environnement immédiat d'un nœud tel qu'il est et non pas tel qu'il est perçu par ce nœud. Cette approche fonctionne en envoyant d'abord la trame de donnée, et en sélectionnant ensuite un relais parmi l'ensemble des stations ayant reçue cette trame [21].

Dans le routage traditionnel, les protocoles présélectionne un ou plusieurs nœuds prédéterminés avant le début de la transmission et emploie un voisin prédéterminé pour expédier un paquet. Le RO quant à lui, surmonte l'inconvénient de la transmission sans fil incertaine en annonçant une transmission qui peut être surprise par des voisins divers [28].

Le RO augmente l'efficacité, la sortie et la fiabilité des réseaux de capteurs. Beaucoup de techniques d'économie d'énergie ont été présentées en utilisant le principe du RO dans les RCSFs pour augmenter la durée de vie du réseau [17].

### 3.2.2 Principe de fonctionnement

La nouvelle approche RO emploie la nature de radiodiffusion du réseau sans fil pour l'expédition de paquets. L'idée principale derrière le RO est d'employer la nature de radiodiffusion du réseau sans fil tels que la transmission d'un nœud peut être surprise par des nœuds multiples.

Au lieu de choisir le prochain nœud d'expéditeur en avant, le RO choisit le prochain nœud dynamiquement à l'heure de la transmission. L'expédition est faite par le nœud le plus proche de la destination. La tâche principale du RO est de choisir l'expéditeur placer et donner la priorité aux nœuds dans l'ensemble.

Considérer l'exemple suivant (voir la figure 3.1), ici le nœud S de source a quatre nœuds intermédiaires avec la probabilité de la livraison de paquet de 15%. Chaque nœud intermédiaire a la probabilité de la livraison de paquet de 85% à la destination. Le routage traditionnel choisira seulement un nœud intermédiaire pour l'expédition de données, alors que le RO considérera tous ces nœuds pour l'expédition de données. Ainsi, le RO s'avère plus efficace et fiable que le routage traditionnel [17].

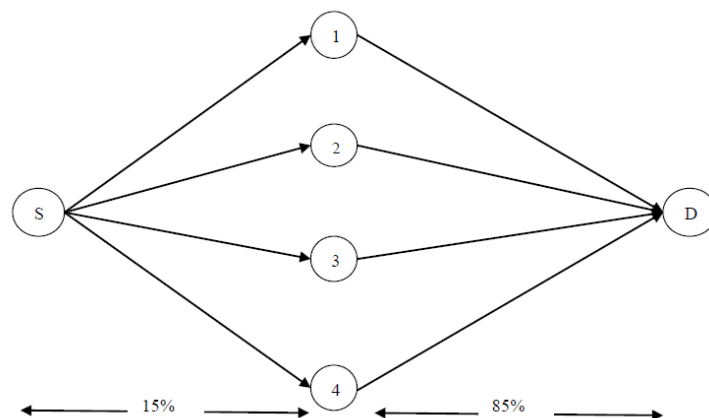


FIGURE 3.1 – Illustration principe de fonctionnement du routage opportuniste

### 3.3 Avantages du routage opportuniste

vu le fonctionnement de RO, ce dernier compte plusieurs avantages dont :

#### 3.3.1 Augmenter la fiabilité

Le RO transmet les paquets à travers n'importe quel lien possible plutôt qu'à travers un seul lien spécifique, en d'autres termes le RO a des liens de secours additionnels ce qui réduit la probabilité d'échec de transmission [3].

#### 3.3.2 Augmente la qualité de la transmission

Le RO prend en compte toutes les liaisons pour transmettre un paquet, cela inclus les liaisons courtes portées de bonne qualité et les liaisons longues portées de mauvaise qualité, ce qui fait qu'avec une seule transmission, un paquet peut être délivré avec succès grâce à une transmission longue portée au lieu de passer par tous les nœuds intermédiaires. Par conséquent, la performance peut être améliorée [3].

Les résultats d'analyse théorique et d'expérimentation ont montré que le RO a le potentiel d'exécuter le routage mieux que traditionnel [3].

#### 3.3.3 Détermination efficace des nœuds d'expédition

Une des avantages majeures du RO c'est que le prochain relais est choisi dynamiquement à travers plusieurs relais, de ce fait, le risque de perte des paquets diminue [17].

#### 3.3.4 Optimisation d'énergie

Le RO peut être appliqué aux RCSFs pour réduire la consommation d'énergie provoquée par les retransmissions et les détours dynamiques des nœuds qui ont moins d'énergie. Le RO introduit le concept de sommeil qui incite les nœuds capteurs à s'endormir quand les transmissions des données n'ont pas eu lieu. De ce fait, le RO permet aux capteurs de préserver leur énergie [25].

### 3.3.5 détermination efficace des nœuds d'expédition

C'est une des avantages majeures du RO car le prochain relais est choisi d'une façon dynamique à travers plusieurs relais candidats [25].

## 3.4 Composants du routage opportuniste

La conception d'un protocole de RO doit prendre en compte certaines notions de bases qu'on va citer ci-dessous :

### 3.4.1 La sélection des candidats

Du fait de la nature diffusion du sans-fil, une trame envoyée en diffusion va être reçue potentiellement par tous les nœuds du voisinage. Parmi les récepteurs, qu'on appelle relais potentiels sont les récepteurs pouvant faire progresser la trame vers la destination.

La première difficulté est donc d'avoir un moyen permettant de sélectionner le sous-ensemble de nœuds parmi les récepteurs pouvant participer au relayage. Un mauvais discriminant risquerait de mettre à contribution des nœuds offrant une capacité de progression vers la destination moins performante que la source elle-même [21].

Tous les nœuds dans le réseau utilisent un algorithme de sélection pour choisir l'ensemble des nœuds voisins (candidats) qui peuvent aider de la meilleure façon qui soit dans le processus d'expédition vers une destination donnée, Et en même temps réduire au minimum le nombre prévu de transmissions [13].

#### 3.4.1.1. Les métriques du routage opportuniste

Dans le but de sélectionner et de prioriser un ensemble des nœuds candidats, les algorithmes de routages opportunistes utilisent une ou plusieurs métriques [13]. Dans la suite de ce chapitre, ces métriques seront présentées .

### 3.4.2 Coordination des candidats

La coordination est le mécanisme utilisé par les nœuds candidats pour définir lequel a la priorité la plus élevée pour recevoir et ainsi expédier le paquet.

La coordination exige la signalisation parmi les nœuds, et la coordination imparfaite peut causer une redondance dans la transmission des paquets.

Une bonne coordination entre les nœuds candidats devrait choisir le meilleur dans un temps record et sans occasionner de redondance dans la transmission des paquets [13].

Les approches de coordination sont divisées en quatre catégories principales basées sur le mécanisme utilisé :

- Coordination basé sur un acquittement (acknowledgment-based coordination)
- Coordination basé sur un time (timer based coordination)
- Coordination basé sur le codage réseau (Network Coding coordination)
- Basée sur les messages RTS/CTS (Request-To-Send/Clear-To-Send)

### 3.4.3 Filtrage des candidats relais

En augmentant le nombre de relais potentiels, on augmente également le risque de provoquer plusieurs retransmissions de la même trame par des relais différents. Afin d'éviter une tempête de retransmission, il faut décrire un mécanisme permettant de coordonner les nœuds à la fois pour sélectionner un seul relais parmi l'ensemble des relais potentiel et supprimer les autres pour les empêcher de propager inutilement la trame.

La suppression consiste donc à éviter les duplications de trames en retirant des relais potentiels non sélectionnés de la procédure. Cela doit être fait avec un coût minimum car un échange de messages trop important risquerait de neutraliser les avantages du routage opportuniste qui consiste justement à diminuer au maximum les transmissions inutiles [21].

## 3.5 Métriques de routage opportuniste

Une bonne méthode de coordination devrait réduire les retransmissions et les transmissions sans fil. La coordination implique la sélection et le choix du candidat relais. La sélection des nœuds qui ont reçus des paquets est faite à travers des contraintes puis le meilleur nœud est choisi comme candidat de relais pour expédier les paquets.

Les candidats sont sélectionnés et choisis selon des métriques comme la force virtuelle de lien, la connectivité de candidat, le niveau de la contribution et la probabilité de transmission de reproduction. Des facteurs comme la coordination sans fil la corrélation spatiale doivent également être pris en compte pendant le choix du candidat.

La métrique utilisée pour le choix de candidat est nommée nombre de saut (Hop-Count : HC), nombre prévu des transmissions (Expected Transmission Count : ETX), temps de transmission (expected transmission time : ETT) et nombre de transmissions multi-chemins (Expected Anypath Transmission : EAX).

La métrique HC est le vecteur traditionnel de distance, tandis qu'ETX et ETT sont des métriques d'état de lien.

Après que les paquets soient reçus par les candidats, le filtrage est fait pour enlever les nœuds qui peuvent diminuer l'exécution du réseau. Pendant que la liste de candidat est généralement incluse dans l'en-tête des paquets, le nombre de candidats est limité pour réduire au minimum les transmissions doubles [1].

### 3.5.1 Métrique nombre de saut

Peut être définie comme le nombre de périphérique réseaux entre le nœud source et le nœud destinataire ou le nombre de liaison point à point dans un chemin de transmission.

Le nœud source génère des paquets qui incluent un champ réservé au compteur de nœuds (HC). A chaque fois qu'un dispositif est capable de recevoir ces paquets, ce dispositif modifie le paquet en incrémentant le champ hop count. En outre, le dispositif compare le champ contre une limite prédéterminée et jette le paquet si la valeur du champ est trop haute. Ceci empêche les paquets de rebondir sans fin dans le réseau dû aux erreurs de cheminement [1].

### 3.5.2 Métrique ETX

La métrique ETX calcule le nombre de transmission pour chaque route le long du chemin de la source vers la destination.

L'ETX étudie les pertes de liaisons radio et les contraintes d'interférences pour trouver le meilleur chemin dans le réseau sans fil avec le moins de perte de transmission radio possible et le minimum d'interférences.

La métrique ETX est meilleur quand elle est comparée à la métrique Hop Count en particulier dans les grands réseaux [1].

### 3.5.3 Métrique ETT

La métrique ETT estime le temps requis pour transmettre un paquet sur une liaison. ETT peut être calculé en ajustant la métrique ETX selon la taille du paquet et la capacité de transmission de la liaison [1].

$$ETT = ((ETX \times \text{la taille du paquet}) / \text{capacité de transmission de la ligne})$$

### 3.5.4 Métrique EAX

EAX capture le nombre prévu de transmissions de chaque lien entre l'expéditeur jusqu'au destinataire et aide à déterminer la contribution d'un candidat à la livraison des paquets entre une paire de nœud [1].

## 3.6 Classes des protocoles de routage opportuniste

Une des caractéristiques principales des protocoles de routage opportunistes est comment déterminer l'ensemble des nœuds expéditeur et comment assigner la priorité à ces nœuds dans l'ensemble. Afin de mesurer la convenance d'un nœud pour appartenir à cet ensemble c-à-d, pour déterminer sa priorité, une métrique est employée. Selon le genre de métrique, nous avons classifié les protocoles opportunistes dans les classes suivantes :

### 3.6.1 Selon la méthode de sélection de l'expéditeur

Dans cette classe on distingue deux stratégies : La stratégie de Bout en Bout (End-To-End : ETE) et La stratégie de proche en proche (Hop-By-Hop : HBH) qui sont définies ainsi :

#### 3.6.1.1. La stratégie de Bout en Bout :

Avec le choix de l'expéditeur ETE, l'ensemble des expéditeurs peut être déterminé une fois pour toutes, (l'information relative réglée d'expéditeur peut être diffusée par des paquets de données, être maintenue aux nœuds intermédiaires).

Le choix de l'expéditeur de bout à bout peut mener pour reproduire des transmissions puisque les expéditeurs non-voisins peuvent prendre des décisions contradictoires sur l'expédition de paquets [20].

### 3.6.1.2. La stratégie de proche en proche :

Avec le choix de l'expéditeur HBH, chaque paquet envoyé (source y compris) détermine indépendamment son propre expéditeur réglé le long du chemin à la destination prévue. Un expéditeur choisi continuera encore ce processus jusqu'à ce que le paquet atteigne sa destination.

Généralement la stratégie ETE surpasse la stratégie HBH puisque la première peut optimiser le choix d'un ensemble d'expéditeurs avec plus d'informations sur l'état des réseaux recueillis. Cependant, la stratégie HBH est facile à mettre en application et mesure bien. La taille de l'ensemble des expéditeurs est également un facteur affectant l'exécution du protocole de routage opportuniste. Une plus grande taille peut augmenter la probabilité de réussite de la livraison d'un paquet [20].

### 3.6.2 Selon la métrique pour le classement par ordre de priorité

Après qu'un ensemble d'expéditeur ait été choisi, nous devons assigner des priorités pour ces expéditeurs. La sélection d'une bonne métrique a un grand impact sur la performance du réseau. Les candidats expéditeurs peuvent être classés selon la priorité basée sur le nombre prévu de transmission (ETX), le nombre de saut, la geo-distance, le codage, et ainsi de suite.

L'utilisation du compteur de saut ou de l'ETX a besoin d'un protocole fondamental de cheminement (réactif ou proactif) pour recueillir une telle information. La geo-distance exige la disponibilité des informations de localisations des nœuds. Une stratégie de codage peut être employée pour réduire au minimum le nombre de transmissions. La manière dans ces métrique ont été intégré dans la conception de protocole peut considérablement affecter les performances de ces protocole. D'ailleurs, l'exactitude d'une métrique dépend de la mesure appropriée, de la qualité de lien et de la diffusion opportune<sup>1</sup> d'une telle information [20].

### 3.6.3 Selon la Coordination distributive pour le classement par ordre de priorité

Dans certains mécanismes la décision de classement par ordre de priorité entre les nœuds candidats à l'expédition est prise par la coordination distributive, qui lors de la réception d'un paquet concurrencent les nœuds, les uns avec les autres, pour choisir le meilleur afin de continuer la tâche de l'expédition.

Ces choix différés donnent, à chaque transmission, plusieurs opportunités afin de progresser. Cependant, il peut présenter certaine latence supplémentaire lors de la livraison de paquet. Quelques autres mécanismes peuvent employer des paquets de contrôle explicites échangés immédiatement avant ou après une transmission de données pour la coordination distributive. Par exemple, l'algorithme de routage (RTS/CTS) peut être employé pour choisir le meilleur parmi les expéditeurs potentiels qui répondent dans un ordre par priorité. Lors de la réception du premier CTS, l'expéditeur commence immédiatement à transmettre des données à ce nœud. Cette stratégie peut éviter la redondance de transmissions.

Une autre stratégie est de permettre aux candidats d'expéditeur qui, lors de la réception d'un paquet, renvoient un acquittement (ACK) dans un ordre prédéterminé. Le pre-

---

1. Qui convient au temps, aux lieux, aux circonstances, qui survient à propos

mier nœud renvoyant un ACK gagne et les autres démissionnent. Cette stratégie exige que les candidats expéditeurs soient des voisins pour que la transmission d'un ACK puisse être reçue par tous. Parmi les travaux existant, il y a également quelques autres mécanismes qui n'exigent aucune coordination parmi les candidats expéditeurs. Dans ces mécanismes les paquets sont diffusés en broadcast, cela peut en grande partie simplifier la conception de protocole MAC à la pénalité des transmissions doubles accrues aux nœuds destinataires [20].

### 3.6.4 Selon le choix déterministe / probabiliste de l'expéditeur

Il existe deux façons de déterminer si un candidat parmi les expéditeurs recevant un paquet sera un vrai expéditeur, la façon déterministe ou probabiliste définis comme suit :

Déterministe : dans cette structure, on parle d'une collection de nœuds qui forment des chemins multiples reliant une paire source-destination. Dans ce cas, un expéditeur candidat avec la priorité la plus élevée est choisi comme prochain expéditeur (Dans ce cas là, sa exige une coordination des nœuds).

Probabiliste : par le choix probabiliste d'expéditeur, à la réception d'un paquet de données, un candidat d'expéditeur décidera indépendamment une probabilité avec laquelle il s'est choisi lui-même comme expéditeur. Le choix probabiliste n'exige aucune coordination entre les expéditeurs candidats [20].

### 3.6.5 Selon la topologie / localisation

Par le choix basé sur la localisation, les expéditeurs et leurs priorités sont déterminés avec peu ou pas d'information sur l'état globale de réseau, en revanche, le choix basé sur la topologie exige d'avoir des informations sur l'état du réseau (voir local ou global) pour permettre un cheminement opportuniste efficace. Avec plus d'information, une métrique efficace peut être utilisée pour régler le classement des expéditeurs par ordre de priorité [20].

Généralement, le choix basé sur la topologie a une meilleure exécution tandis que le choix basé sur la localisation a une meilleure évolution pour les réseaux sans fil [20].

### 3.6.6 Selon le Codage de données

L'intégration du RO avec une stratégie appropriée de codage peut considérablement l'améliorer, par exemple : la correction d'erreurs appelé (forward error correction : FEC) peut réduire le rapport de perte de paquet des liens qui affecte par conséquent le classement d'expéditeurs par ordre de priorité.

L'intégration du codage de réseau et le RO peut réduire le nombre total de transmissions en guidant les paquets à de prochains nœuds avec plus de chances de codage [20].



## 3.7 Les protocoles de routage opportuniste

Les recherches avancées dans le domaine de routage opportuniste ont conduit à l'apparition de plusieurs protocoles différents les uns des autres. Dans ce qui suit nous allons présenter quelques protocoles de RO vu dans la littérature, leur fonctionnement, ainsi que leurs avantages et inconvénients :

### 3.7.1 Extreme Opportunistic Routing (ExOR)

C'est un protocole de RO créé en 2004 au MIT. Ce protocole fonctionne en pré-déterminant l'ensemble des relais potentiels avant la destination et en organisant la suppression en ordonnant les transmissions des relais potentiels de façon à privilégier les meilleurs.

ExOR fait l'hypothèse que toutes les paires d'ETX du réseau sont connues de chaque nœud. À partir de ces informations, lorsqu'une source souhaite transmettre des données à une destination, elle construit d'abord la *forwarder list*, la liste des relais pouvant participer au relaiage des trames. Pour chaque relais de cette liste, un coût est associé désignant le nombre moyen de transmissions nécessaires pour aller jusqu'à la destination en passant par ce relais (calculé en sommant les ETX). Proportionnellement à ce coût, la source spécifie un timer pour chaque relais désignant à quel moment la transmission sera possible. La liste des relais et leurs timers sont placés dans les entêtes de chaque trame envoyée par la source. De cette façon, chaque relais attend son tour avant de commencer ses retransmissions en laissant la priorité aux meilleurs relais. Les trames ne sont pas acquittées directement auprès de la source avec un ACK car chaque trame est envoyée en broadcast, à la place ExOR utilise un mécanisme de *gossiping*.

ExOR opère sur un lot de trames, la source envoie ses trames en diffusion à la suite, sans interruption, et la destination renvoie la liste des trames qu'elle a reçues. Les relais commencent ensuite à retransmettre ce qui est nécessaire, les meilleurs relais en premier. Chaque retransmission contient également dans son entête la liste des trames déjà reçues ou déjà retransmises. De cette façon, chaque relais met à jour la liste des trames restant à transmettre en écoutant les retransmissions des autres relais. Lorsque le dernier relais a fini ses retransmissions, la source retransmet toutes les trames n'ayant été ni reçues ni retransmises.

Des expériences réelles effectuées sur la plateforme d'expérimentation RoofNet ont montré qu'ExOR permettait d'augmenter le débit de plus de 35%. ExOR fonctionne encore mieux pour les nœuds éloignés en offrant une plus grande augmentation de. Si les résultats de ExOR sont très impressionnants, cet algorithme fait cependant l'hypothèse que toutes les paires de liens sont connues, ce qui constitue une hypothèse très forte. De plus, la sélection du meilleur relais se fait en se basant sur la métrique ETX qui n'est pas adaptée pour une approche opportuniste car elle ne prend pas en compte la diversité des chemins possibles [21].

### 3.7.2 Mac independant and Opportunistic Routing and En-Coding (MORE )

MORE utilise l'approche de codage réseau et évite la coordination de réseau dans le routage opportuniste. Dans ce protocole, les paquets de données sont toujours codés pour leur émission.

More fonctionne comme suit, quand la source est prête à envoyer, elle maintient à créer les paquets codés appelé patch par l'intermédiaire de la combinaison linéaire aléatoire des  $K$  paquets indigènes dans le groupe courant. La source continue à envoyer de tels paquets codés dehors jusqu'à ce que le groupe entier soit reconnu par la destination, quand la source procède au prochain groupe [30]. Avec MORE, les paquets de données sont toujours codés et portent une liste d'expéditeurs et d'un enregistrement de vecteur de code contenant la façon dont les paquets indigènes sont combinés. Quand le paquet sera coder et finalement prêt, un nœud dans la liste des expéditeurs vérifie d'abord l'innovation du paquet (c.-à-d., s'il contient de nouvelles informations non incluses dans les paquets de données précédemment reçus). Plus particulièrement, un paquet est innovant s'il est linéairement indépendant des autres. Un expéditeur seulement stocke les paquets innovateurs. En outre, chaque expéditeur maintient un compteur TX qui est calculé par un algorithme distribué basé sur le concept d'ETX, quand un expéditeur reçoit un paquet innovateur d'un nœud ascendant, il incrémente le compteur par son crédit de TX ( $0 < TX < 1$ ), et quand la couche MAC permet au nœud de transmettre, le nœud vérifie si le compteur est positif. Si oui, le nœud crée un paquet codé, le transmet, décrémente alors le compteur par un. Si le compteur est zéro ou négatif, le nœud ne transmet pas. Une fois la destination reçoit les  $K$  paquets innovateurs, elle code le groupe entier puis elle envoie un acquittement de nouveau à la source pour lui permettre de se déplacer au prochain groupe [20].

### 3.7.3 Simple Opportunistic Adaptive Routing Protocol (SAOR)

Ce dernier a été présenté afin de supporter des flots multiples. C'est un protocole de routage proactif où chaque nœud maintient une table de routage contenant la destination, la route sélectionnée par défaut et la liste des nœuds impliqués dans la participation. La sélection de la route peut être basée sur la métrique ETX ou n'importe quelle autre métrique tout en tenant compte de la priorité. A la différence de MORE, SOAR permet aux nœuds non sélectionnés et qui soient proches de la route établie par défaut de participer dans la transmission afin de minimiser des transmissions inutiles. Cependant, la source doit limiter le nombre de nœuds concernés. En ce qui concerne les transmissions, SOAR procède de la même manière que le protocole Transmission Control Protocol et le compteur de temps est calculé pour estimer l'instant de la prochaine transmission [11].

### 3.7.4 Geographic Random Forwarding (GeRaF)

Dans les réseaux sans fil les nœuds sont habituellement à piles. Ainsi le cheminement doit être conçu de telle manière que l'énergie soit conservée.

Dans GeRAF (Zorzi et Rao, 2003), appelé, L'expédition aléatoire géographique, le nœud de relais n'est pas connu antérieurement par l'expéditeur mais on le connaît seulement après que le paquet a été transmis, c'est parce que dans le milieu sans fil les nœuds sont dans le mouvement aléatoire et un nœud peut ne pas se rendre compte de la topologie et du meilleur nœud du prochain relais. En conséquence, le paquet est annoncé et un

arrangement de controverse est exigé pour éviter la duplication des paquets, les données sont transmises de n'importe quel nœud ; il annonce le paquet avec sa propre adresse et avec l'adresse de la destination, tous les nœuds qui reçoivent le paquet calculent sa priorité en ce qui concerne sa distance de la destination et lui vérifie l'adresse, seulement ces nœuds voisins plus près de la destination que l'expéditeur peuvent être des candidats d'expédition, D'ailleurs, ces candidats éligibles se rangent ont se basant sur leurs géo-distances à la destination. De cette façon l'ensemble et le classement par ordre de priorité d'expéditeur peuvent facilement être mis en application par l'intermédiaire d'un dialogue de RTS-CTS à la couche de MAC. Le nœud de relais expédie alors le paquet au prochain nœud adjacent dans son secteur d'assurance qui est le plus proche de la destination avec sa propre adresse et l'adresse de la destination prévue. Cet arrangement de routage continue alors jusqu'à ce que le paquet atteigne un nœud destinataire, si la topologie est telle qu'il n'y a aucun nœud plus près de la destination, alors le nombre de nœuds est incrémenté par un et les nœuds de transmission produiront indépendamment un ensemble possible de nœuds de relais pour transférer le paquet de sorte que le paquet atteigne la destination en nombre d'heures fini.

Le facteur clé de cette méthode c'est-à-dire GeRAF est que seulement l'endroit de la destination est nécessaire et aucunes autres informations sur l'arrangement des nœuds dans le réseau est nécessaire. C'est un avantage important parce que les nœuds peuvent être stationnaires ou dans le mouvement aléatoire et la topologie continue ainsi au changement. Il soutient la mobilité de nœud également. Si les nœuds de relais sont en mode de sommeil, ils ne pourront pas recevoir le paquet [20] [2].

### 3.7.5 Opportunistic Routing in Dynamic Ad Hoc Networks (OPRAH)

OPRAH construit un ensemble de chemin sous forme de tresse multivoies depuis la source vers la destination par l'intermédiaire du cheminement sur demande pour expédier les données à travers le routage opportuniste. OPRAH permet à des nœuds intermédiaires d'enregistrer plus de sous-chemins de retour vers la source et en générale ces sous-chemins permettent le transfert inverse de données vers la destination par l'intermédiaire des demandes d'itinéraires et des réponses d'itinéraires reçus.

L'un des avantage de OPRAH est qu'il permet d'augmenter la fiabilité de la transmission bout en bout, avec OPRAH il peut y'avoir une redondance dans les paquets reçus au niveau du nœud destinataire parce que la route établie peut contenir des chemins disjoints ou des chemins partiellement disjoints d'un nœud intermédiaire jusqu'à la destination [20].

### 3.7.6 Energy-Efficient Opportunistic Routing in Wireless Sensor Networks (EEOR)

EEOR est un algorithme qui fonctionne suivant le même principe que ExOR en pré-sélectionnant la liste des candidats et en choisissant un candidat potentiel dans cette liste pour relayer les données. Deux scénarios ont été présentés dans le papier pour ajuster la puissance des nœuds pendant la transmission.

Dans le premier scénario, on suppose que les nœuds capteurs ne peuvent pas ajuster la puissance disponible avec eux. Dans l'autre cas la puissance de transmission peut être ajustée par le nœud capteur à chaque transmission.

Quand la liste des expéditeurs a été formée, le coût prévu de la transmission a été enregistré contre chaque entrée du nœud expéditeur. Au début, le coût est zéro pour tous les nœuds. Le cheminement de vecteur de distance a été employé pour décider les itinéraires après que le coût prévu ait été calculé. L'évaluation de performance de EEOR montre qu'il est meilleur par rapport à ExOR en termes de délai de bout en bout, rapport de perte de paquet, consommation d'énergie, et délai moyen d'attente de la livraison [22].

### 3.7.7 Resilient and Opportunistic routing solution for Mesh Networks (ROMER)

ROMER est un protocole de RO destiné aux réseaux maillé (mesh) et dans le fonctionnement est basé sur des crédits. Par le biais de ces crédits, le protocole spécifie le cout en termes d'énergie encouru dans la transmission d'un paquet.

Étant donné un paquet de données, celui-ci se voit attribué un crédit qui représente le coût minimum pour transmettre le paquet de la source jusqu'à la destination (c.-à-d. le trafic le plus commun dans un réseau maillé sans fil) plus un surcoût pour permettre la découverte d'itinéraires multiples, cependant seul les chemins qui n'excèdent pas le coût prévu de crédits peuvent être découvert. L'algorithme qui construit la route depuis la source vers la destination recommande que la consommation de crédits doit être plus haute dans les secteurs plus près de la source.

Une fois que la route est construite, la transmission de données est probabiliste, de cette façon, la source envoie toujours le paquet de données au nœud candidat sur le meilleur lien [30].

### 3.7.8 Directed Transmission Routing Protocol (DTRP)

Le fonctionnement de ce protocole est, à peu près, similaire au protocole ROMER, pour crée le réseau de transmission maillé, ajuste la probabilité d'expédition aux expéditeurs potentiels d'une manière différente.

Les avantages de ROMER et de DTRP sont leurs simplicités et fiabilité élevée dans la livraison de données. DTRP et ROMER peuvent fournir des copies de données superflues sur la structure du réseau maillé (mesh), qui convient fortement aux environnements sans fils à forte perte [20].

### 3.7.9 Opportunistic Routing in Wireless Networks with Segmented Network Coding (CodeOR)

Yunfeng Lin et al ont proposé CodeOR. Ce dernier est le protocole le plus approprié pour les applications multimédia en temps réel de par son utilisation de segments de petite taille qui diminue le délai de retard. En utilisant la diffusion sans fil du routage opportuniste celui-ci améliore le débit des transmissions unicast.

CodeOR effectue le codage segmenté de réseau, celui-ci partitionne les données en de multiples segments et code seulement les paquets dans le même segment. Le protocole CodeOR emploie le codage réseau afin d'améliorer le débit de transmission [3].

### 3.7.10 A Novel Cooperative Opportunistic Routing Scheme in Mobile Ad Hoc Networks (CORMAN)

CORMAN Est un protocole conçu pour supporter des flux de données multiples et simultanées. Quand un nœud surprend un paquet d'un nœud voisin, il enregistre le temps que prend le nœud voisin pour transmettre le paquet afin d'estimer par la suite la durée qu'il faut pour transmettre tous les paquets dans le fragment, et d'estimer aussi à quel moment le nœud voisin va terminer sa transmission et permettre au nœud de transmettre à son tour.

Ceci représente la période de back-off de données et permet de refléter la charge du trafic dans le réseau. Si les flux multiples concurrencent pour les ressources dans le réseau, CORMAN leur permet de partager le réseau d'une manière très ordonnée. Il facilite aussi l'expédition opportuniste de données en utilisant la qualité du lien entre chaque nœud. CORMAN emploie le cheminement proactif pour échanger les informations dans le réseau [1].

### 3.7.11 Opportunistic Any Path Forwarding (OAPF)

En utilisant Exor par exemple qui utilise la métrique ETX, cette condition simple peut mener des paquets de données à prendre les itinéraires de basse qualité, de ce fait, le protocole OAPF (expédition opportuniste de tout chemin) est venu pour surmonter ce problème en introduisant la métrique EAX.

Dans OAPF, au lieu de la radiodiffusion pour tous les prochains nœuds, choisir de bons nœuds pour réduire le nombre de transmissions, la métrique EAX (Expected Any path count) est employée pour décider le prochain candidat. Cette métrique calcule d'une manière récursive le nœud proche optimal réglé à chacun des expéditeurs potentiels pour atteindre la destination.

Dans ce protocole, tout en calculant la valeur d'EAX d'un nœud, les rapports de la livraison de tous les prochains chemins possibles sont considérés. EAX aide également à déterminer la contribution d'un candidat à la livraison des paquets entre les nœuds.

OAPF est principalement employé parce qu'il réduit au minimum le nombre de candidats dans l'ensemble des expéditeurs et ceci sans affecter les performances et l'exécution contrairement à Exor.

Les valeurs d'ETX aident à déterminer la contribution d'un candidat à la livraison des paquets.

Pendant la transmission de données, OAPF est plus optimiste qu'EXOR ou routage traditionnel parce que tout en calculant la valeur d'EAX la probabilité de tous les différents chemins d'un expéditeur particulier à la destination est considérée. Mais l'inconvénient principal est que l'information d'état de réseau doit être maintenue [20] [2].

### 3.7.12 Hybrid ARQ-based intra-cluster geographically-informed relaying (HARBINGER)

HARBINGER combine entre le concept de l'expédition aléatoire géographique (GeRaF) et Hybride-ARQ (Automatic Repeat Request) c'est-à-dire, la demande automatique de répétition hybride.

Dans GeRaF, quand les nœuds fonctionnent avec le sommeil aléatoire programmé pour l'économie de batterie, chaque transmission peut avoir besoin de l'aide multiple à la

couche MAC avant qu'un paquet soit relayé. La différence entre GeRaF et HARBINGER est comme suit :

Quand il n'y a aucun expéditeur, avec GeRaF, tout doit reprendre de telles sortes que l'expéditeur fera une nouvelle tentative de transmission [2]. En revanche, dans HARBINGER, l'hybride ARQ est employé pour qu'un récepteur combine l'information accumulée des transmissions multiples du même expéditeur. Spécifiquement, quand un noeud décide de recevoir des paquets, il garde chaque paquet qu'il reçoit du même expéditeur de sorte que la vieille information puisse être combinée avec l'information fraîche obtenu après chaque nouvelle transmission d'ARQ. Par la suite, ce noeud récepteur pourra décoder le paquet. En conséquence, plus la transmission faite par un expéditeur, plus la gamme de communication est plus prolongée qui peut être réalisé. HARBINGER fournit une meilleure différence de latence d'énergie que GeRaF, en particulier quand la densité de noeuds est basse [20].

### 3.8 Comparaison entre les différents protocoles de routage opportuniste

Nous présentons ici la classification des protocoles de routage opportuniste dans les RCSFs discutés dans la section précédente. La table ci-dessous montre comment ces protocoles s'adaptent aux différentes catégories.

Catégories et Protocoles	Selon la méthode de sélection de l'expéditeur	Selon la métrique de sélection de nœud	Selon la Coordination des candidats à l'expédition	Selon le choix déterministe / probabiliste de l'expéditeur	Selon le codage	Selon la topologie / localisation
ExOR	Bout en bout	ETX	Basé ACK	Déterministe	Non	Topologie
MORE	Bout en bout	ETX	Aucun	Déterministe	Codage	Topologie
SAOR	Proche en proche	ETX	Détection de spectre	Déterministe	Non	Topologie
GeRaF	Proche en proche	Geo-distance	RTS / CTS	Déterministe	Non	Localisation
OPRAH	Bout en bout	Nbr de saut	Aucun	Déterministe	Non	Topologie
EEOR	Bout en bout	coût prévu	Basé ACK	Déterministe	Non	Topologie
DTRP	Bout en bout	Nbr de saut	Aucun	Probabiliste	Non	Topologie
CodeOR	Bout en bout	ETX	Aucun	Déterministe	Codage	Topologie
ROMER	Bout en bout	Nbr de saut	Aucun	Probabiliste	Non	Topologie
CORMAN	Bout en bout	ETX	Aucun	Probabiliste	Non	Topologie
HARBINGER	Proche en proche	Geo-distance	Basé ACK	Déterministe	Codage	Localisation
OAPF	Proche en proche	EAX	Basé ACK	Déterministe	Non	Topologie

TABLE 3.1 – Classification des protocoles de routage opportuniste

Le tableau ci-dessus montre la classification qu'on a pu établir dans la section précédente des différents protocoles qu'on a étudiés dans ce troisième chapitre.

Comme cité précédemment le routage opportuniste est un concept récent, de ce fait il est difficile de trouver une classification conforme et universelle pour les protocoles de routage opportuniste. Cependant leurs conceptions soulèvent certaines questions fondamentales comme le choix de l'ensemble des expéditeurs, la priorité, la duplication ou la suppression d'expéditeurs ...etc, les réponses à ces questions nécessitent de prendre en compte des critères tels que l'efficacité, la compatibilité avec les mécanismes de contrôle d'accès au support (MAC), l'utilisation d'information sur l'état du réseau, l'emplacement des nœuds, la méthode de codage ...etc.

En prenant en compte tous ces facteurs ainsi que différentes stratégies de conception, nous avons opté pour la classification suivante :

1. Selon la méthode de sélection d'expéditeurs.
2. Selon la métrique de sélection de nœuds.
3. Selon la méthode de coordinations des candidats à l'expédition.
4. Le choix de l'expéditeur probabiliste ou déterministe.
5. Basé codage ou non codage.
6. Protocole basé sur la topologie du réseau ou sur la localisation.

Chacune de ces classes est subdivisée en sous classes qu'on appellera famille comme pour le routage traditionnel. La figure ci-dessous est représentative de toutes ces classes suivant leurs hiérarchies.



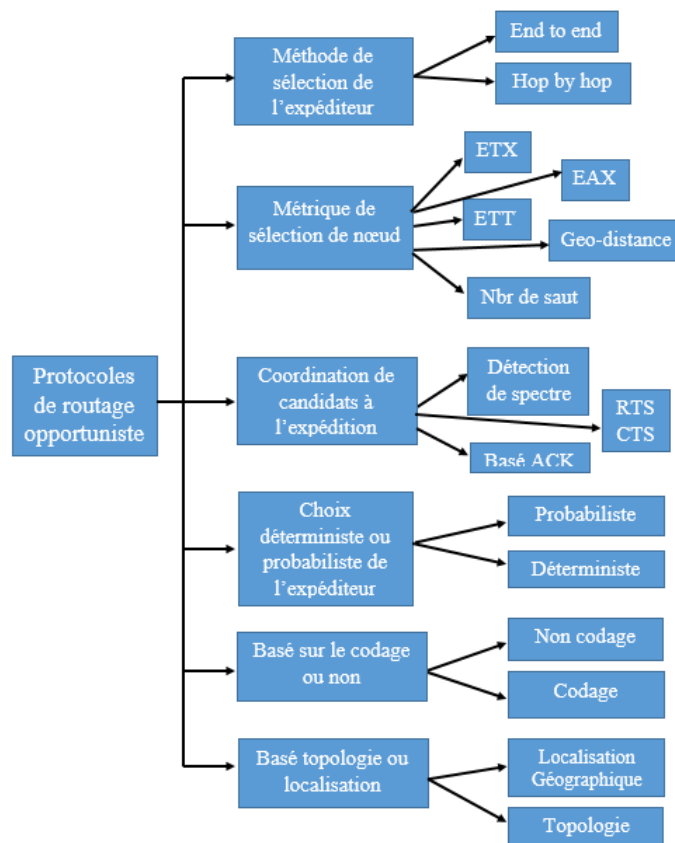


FIGURE 3.2 – Classes des protocoles de routage opportuniste.

A travers ce tableau, on distingue bien les caractéristiques de chaque classes pour chaque protocole de ce fait un protocole de routage opportuniste peut appartenir à plusieurs classes et non à une seul en particulier, donc, il peut appartenir à plusieurs familles mais pas à deux familles de la même classe.

### On prend comme exemple le protocole ExOR :

**ExOR** est présenté dans la littérature comme l'un des protocoles opportunistes de référence. Selon son fonctionnement : il utilise End to end comme méthode de sélection d'expéditeurs, l'ETX comme métrieque pour assigner la priorité à l'ensemble des expéditeurs, il n'est pas basé sur le codage, utilise la topologie du réseau pour acheminer les paquets.

D'après la table (Table 3.1), établie depuis l'étude des protocoles discutés dans la section (3.8), nous avons remarqué que chaque protocole est bon par rapport a des critères de classification. Cependant, il est mauvais par rapport à d'autres, ce qui nous permet de dire qu'il est difficile de concevoir un protocole qui supporte tous ces critères.

### 3.9 Conclusion

Ce chapitre a été axé sur le routage opportuniste dans les RCSFs. Ainsi, une définition de ce dernier et une présentation du principe de fonctionnement. Plusieurs métriques ont été employées, de ce fait, on a établie une classification des protocoles de routage opportuniste a été établie et une liste des protocoles de routage opportuniste a été énumérée. Enfin, un tableau montrant la classification des protocoles de routage a été dressé.

Bien que le RO soit un nouveau concept dans les RCSFs, le chapitre nous a permis de se familiariser avec les protocoles de RO dans les RCSFs, dans ces derniers, la priorité est donnée surtout à la consommation d'énergie.

L'étude de ces protocoles nous a permis de mettre en relief les avantages et les inconvénients des stratégies de routage adoptées par chacun d'eux, bien que plusieurs de ces stratégies paraissent prometteuse, il existe toujours certains défis qui persistent et nécessitent leur prise en considération par les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs.

Nous nous intéressons par la suite à la conception d'une nouvelle théorie optimal en terme de consommation d'énergie pour les RCSFs et qui a pour but d'augmenter la durée de vie du réseau.

La chapitre suivant mènera donc, une étude précise de protocole de routage opportuniste ExOR, puis nous exposons le protocole proposé, son fonctionnement ainsi que ses avantages, puis nous allons terminer par une simulation et évaluation de performance afin de valider notre proposition.

# Chapitre 4

## Le protocole ExOR hiérarchique

## 4.1 Introduction

Dans un RCSF, l'énergie consommée pendant la communication est un facteur très important. Une des conditions les plus importantes de RCSF est de réduire cette consommation d'énergie. Pour cela, nous avons besoin d'une technique ou d'un protocole de routage qui augmentera la durée de vie du réseau.

Pour remédier au problème de consommation d'énergie, nous avons proposés un protocole à base de l'idée suivante : introduire la notion du clustering pour le protocole de routage opportuniste ExOR. Autrement dit, l'idée consiste à concevoir et implémenter le clustering dans le protocole ExOR.

Dans ce chapitre, nous allons mener une étude précise du protocole de routage opportuniste ExOR, nous nous intéressons ensuite à son principe de fonctionnement puis nous allons présenter le protocole proposé, son principe de fonctionnement ainsi que ses avantages, puis nous allons procéder à l'évaluation des performances de ce dernier vis-à-vis d'ExOR.

## 4.2 Protocole de routage opportuniste ExOR

ExOR est le premier protocole de RO, d'autres voies de réflexions ont été conçues après sa mise en œuvre. ExOR est décrit comme une technique de routage opportuniste qui dispose de plusieurs avantages.

### 4.2.1 Fonctionnement

ExOR dispose de différents composants comme tout autres protocoles de RO (§ 3.4), cela afin d'assurer son bon fonctionnement.

- **La sélection des candidats**

Quand la source est prête à envoyer, après avoir généré les batchs, elle doit également établir une liste de relais potentiels classés par ordre de priorité pour relayer le paquet et le transmettre en broadcast [27].

- **Métrique utilisée**

ExOR utilise la métrique ETX (§ 3.5.2) afin d'établir une liste qui détermine la priorité des candidats potentiels. La liste d'expéditeurs contient tous les nœuds qui ont un ETX inférieur à la destination (c.-à-d. le nœud le plus proche de la destination), elle est classée dans l'ordre croissant et reste la même tout au long de transmission du patch [27].

- **Coordination des candidats**

Dans ExOR, les noeuds candidats utilisent une coordination temporisée, avec un acquittement explicite comme mécanisme pour définir lequel a la priorité la plus élevée pour recevoir et ainsi expédier le paquet [27].

- **Filtrage des candidats relais**

La réception d'un paquet par un nœud n'appartenant pas à la liste des nœuds concernés par la transmission provoque son ignorance. Dans le cas contraire, le paquet est stocké dans un buffer et un ordonnancement est assuré. Le nœud le plus prioritaire est autorisé à transmettre en premier et chaque nœud maintient un compteur qui lui permet d'estimer l'instant adéquat pour la transmission. Si un paquet a été déjà transmis par un nœud prioritaire, les autres nœuds doivent le supprimer de leurs espaces de stockage et donc la possibilité qu'un paquet soit retransmis plusieurs fois est faible [27].

## 4.2.2 Avantages de ExOR

ExOR dépend de la couche MAC, les véritable avantages de ce protocole sont :

- Il assure le routage et l'ordonnancement des transmissions afin d'éviter les problèmes de collision.
- Il améliore le débit dans les RCSFs.
- Il augmente la fiabilité de transmission des paquets.

## 4.2.3 Inconvénient de ExOR

Le protocole ExOR souffre du problème de duplication de paquets :

- Plusieurs relais potentiels relayent le paquet, cela induit une consommation d'énergie inutile.
- La redondance des paquets de données.

### 4.3 Protocole ExOR Hiérarchique proposé

Après les nombreuses recherches qu'on a effectuées, nous avons constaté que le protocole ExOR nécessite une amélioration cela afin de remédier au problème de consommation d'énergie par le biais de clustering.

ExOR sélectionne plusieurs relais potentiels pour acheminer un paquet, ce qui provoque une consommation d'énergie inutile. ExOR hiérarchique consiste donc, à introduire le clustering dans le protocole ExOR, autrement dit, élaborer le protocole ExOR à base de clustering.

#### 4.3.1 L'idée de base

Le clustering dans les RCSF est un moyen efficace de structurer le réseau. Le principe initial de clustering est de diviser les  $n$  capteurs en  $k$  clusters (Voir chapitre 2, § 2.3.1 - b). Son but est d'identifier un sous-ensemble de nœuds dans le réseau et de lui attribuer un CH (Cluster-Head). Celui-ci sera en charge de tâches spécifiques comme l'agrégation de données [16].

Afin de bien structurer le réseau en utilisant le clustering, notre algorithme suit les stratégies suivantes :

##### a. Sélection des clusters

La manière dont ce fait la sélection des clusters se base sur le principe du protocole ExOR, donc en calculant l'ETX de chaque nœud, ajoutant à cela le critère de la distance, un nœud appartient à un cluster si d'abord il possède une faible valeur d'ETX par rapport au nœud  $i$ , et il opère dans son rayon de captage (c.-à-d.  $\text{dis}(N(i), N(j))$  est minimal) (Voir algorithme 1).

#### Algorithme 1 : sélection des clusters

Soit  $i$  le nœud capteur  $i$

Soit  $j$  le nœud capteur  $j$

Soit CL un cluster

Cluster ( ) : une procédure de type booléen qui vérifie si un nœud appartient à un cluster.

Dist ( ) : procédure qui calcule la distance entre les différents nœuds du réseau (Dis : C'est le rayon de captage d'un nœud).

```

Pour i allant de 1 à N faire
    Pour j allant de i + 1 faire
        Si ( Dis ( i , j ) > Di ) Alors
            CL [i] ← i ;
            Ajouter le nœud i au CL [i]
        FinSi
    FinPr
FinPr
  
```

```

Pour i allant de 1 à N faire
  Si ( Cluster (i) = vrai ) Alors
    i ← i + 1 ;
  Sinon
    CL [i] ← i ;
    Ajouter i au CL [i] ;
  FinSi

  Pour j ← i + 1 à N faire
    Si ( Cluster (j) = Vrai ) Alors
      j ← j+1 ;
    Sinon
      Si ( ETX ( i , j ) ≤ ETX ) et ( Dis ( i , j ) ≤ Dis ) Alors
        Ajouter j au CL [i] ;
      FinSi
    FinPr
  FinPr
FinPr

```

### b. Election des Cluster-Head

La sélection des cluster-head (CH) approprié se fait en utilisant le critère de l'ETX.

Dans notre protocole, nous utilisons deux CH, le premier appelé cluster head chef (CHC), et le 2ème appelé cluster head assistant (CHA).

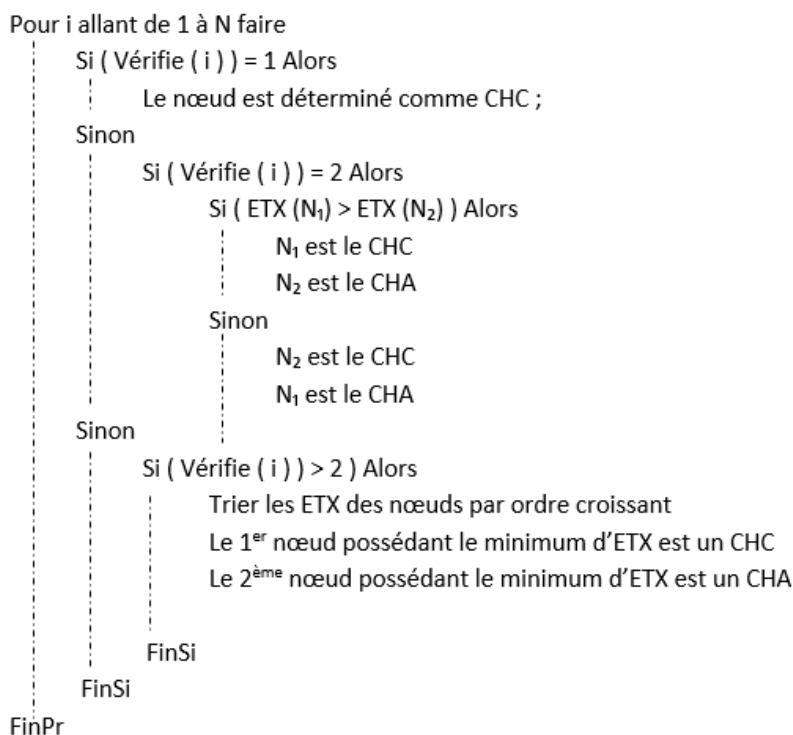
CHC se charge de la communication inter-cluster (entre les différents clusters), et il joue le rôle de point de transfert.

CHA se charge de la communication intra-cluster (entre les différents membres de Cluster), et sert comme relais entre le CHC et les nœuds membres se trouvant dans le cluster.

Dans un cluster, les nœuds sont classés par ordre (vis-à-vis L'ETX par rapport à la SB), Le nœud qui possède un ETX minimal sera élu comme CHC, par contre, le deuxième nœud dans la liste sera élu comme CHA (Voir algorithmme 2).

**Algorithme 2 : Choix des CHA et CHC**

Vérifie ( ) : Procédure qui calcule le nombre de nœud dans un cluster

**4.3.2 Principe de fonctionnement**

Pour réduire la consommation d'énergie, nous proposons un protocole qui est une combinaison de protocole de routage opportuniste ExOR et le principe de clustering, tout en gardant la notion de fonctionnement de RO et ses principales composantes, le protocole ExOR hiérarchique fonctionne ainsi :

- **Sélection des candidats** : La sélection des candidats se fait suivant le mécanisme utilisé par ExOR, donc, quand la source est prête à envoyer, elle établit une liste de relayeurs potentiels classés par ordre de priorité pour relayer le paquet et le transmet en broadcast, ces relayeurs sont des CHC, ceci suivant la métrique ETX.
- **Métrique utilisée** : Tout comme ExOR, notre protocole utilise la métrique ETX pour établir la liste qui détermine la priorité des CHC candidats. La liste d'expéditeurs contient tous les CHC qui ont un ETX inférieur à la destination (c.-à-d. le nœud le plus proche de la destination), elle est classée dans l'ordre croissant et reste la même tout au long de la transmission du paquet.
- **Coordination des candidats** : Tout comme ExOR, les CHC candidats utilisent une coordination basée sur un acquittement comme mécanisme pour définir lequel a la priorité la plus élevée pour recevoir et ainsi expédier le paquet.



- **Filtrage des candidats relais** : La réception d'un paquet par un CHC n'appartenant pas à la liste des noeuds concernés par la transmission provoque son ignorance. Dans le cas contraire, le paquet est stocké dans un buffer et un ordonnancement est assuré. CHC le plus prioritaire est autorisé à transmettre en premier et chaque CHC maintient un compteur qui lui permet d'estimer l'instant adéquat pour la transmission. Si un paquet a été déjà transmis par un CHC prioritaire, les autres CHC doivent le supprimer de leurs espaces de stockage et donc la possibilité qu'un paquet soit retransmis plusieurs fois est faible.
- **Acheminement des données** : Quand la source est prête à envoyer, elle diffuse le paquet une liste qui contient les CHC expéditeurs qu'elle devait établir, cette liste détermine la priorité des CHC. La priorité est déterminée à son tour par l'ETX. Cette liste contient les noeuds qui ont un ETX inférieur à la destination. Le CHC qui possède l'ETX le plus faible est le plus prioritaire. Pour le choix du noeud relais, le noeud le plus prioritaire est sélectionné comme étant le noeud relais.

Après avoir reçu le paquet, le CHC vérifie si la destination est un noeud appartenant à son cluster via son CHA, deux cas se présentent :

- Si oui, donc il le transmet à l'aide d'un saut vers son CHA puis ce dernier fera du même
- Sinon, alors le CHC doit refaire la première étape de sélection des candidats et procède comme avant.

### 4.3.3 Avantages de ExOR hiérarchique

Notre algorithme tire plusieurs avantages du clustering parmi tant on distingue :

- Le contrôle facile de la topologie d'un réseau surtout étendu : grâce à la notion des clusters et leurs propriétés.
- L'algorithme peut réduire la consommation d'énergie : en utilisant des clusters et CHC ainsi que les CHA, le nombre de transmissions diminue, ce qui implique une moindre consommation d'énergie.
- Prolonger la vie du réseau : l'optimisation d'énergie prolonge la vie des noeuds par conséquent la vie du réseau.
- Garder la disponibilité du réseau : en prolongeant la vie du réseau, ce dernier sera disponible pour plus de temps.
- Réduction du nombre de relayeurs potentiels.

### 4.3.4 Exemple montrant le fonctionnement de ExOR hiérarchique

Dans l'exemple qui suit, nous allons mettre en évidence l'une des avantages de notre protocole à savoir minimisation des transmissions :

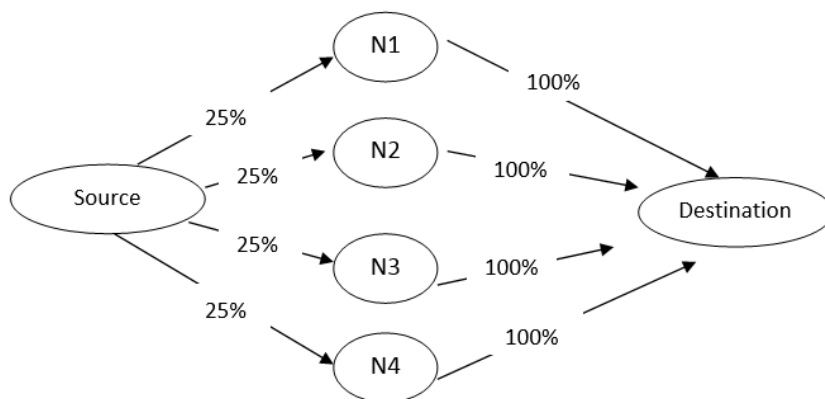


FIGURE 4.1 – Probabilités qu'un paquet soit délivré à une destination utilisant ExOR.

ETX dans ce cas se calculent  $1/Pr$  (a noté que  $Pr$  : probabilité)

$$Nbr\_trans = 1/ETX \tag{1}$$

$$Nbr\_trans = [1/(1 - (1 - 0.25)^4)] + 1 = 2.46 \text{ transmissions} \tag{2}$$

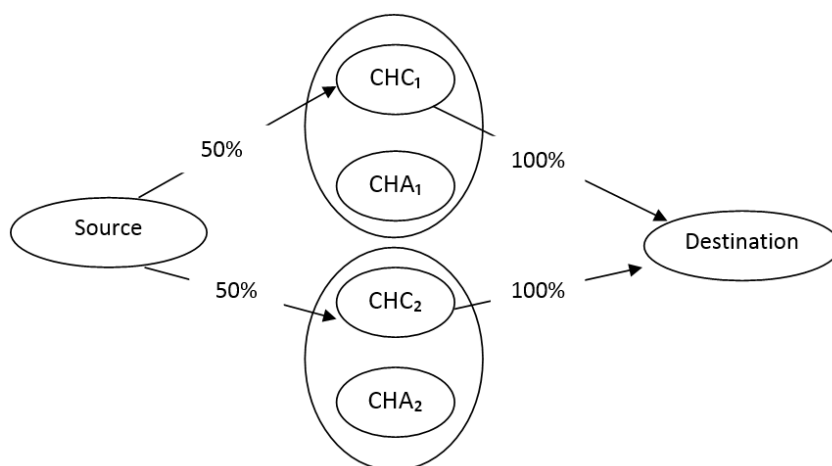


FIGURE 4.2 – Probabilités qu'un paquet soit délivré à une destination utilisant le protocole proposé

$$Nbr\_trans = [1/(1-(1-0.5)^2)] + 1 = 2.33 \text{ transmissions} \tag{3}$$

D'après les deux figures (Fig 4.1 et Fig 4.2), on remarque que le nombre de transmissions a plus au moins diminuer en utilisant le protocole proposé, même avec quatre nœuds, le protocole a réussi à réduire le nombre transmissions (reste à prouver ça dans un réseaux de capteurs plus étendu et plus large avec une évaluation de performance sur Matlab).

En ce qui concerne l'énergie consommée, si chaque nœud possède 1 joule d'énergie résiduelle, et que lors d'une transmission (émission ou réception), le nœud consomme 0.01 Joule :

Avec ExOR, on aura consommé :  $2.46 * 0.01 = 0.0246$  J, par contre avec le protocole proposé l'énergie consommé est :  $2.33 * 0.01 = 0.0233$  J. D'où, la réduction du nombre de transmissions, ce qui entraine une optimisation de l'énergie consommée.

## 4.4 Evaluation de performances de ExOR hiérarchique

Après avoir détaillé le fonctionnement du protocole opportuniste ExOR hiérarchique ainsi que le protocole ExOR, et donné les algorithmes à implémenter, nous présentons dans ce qui suit les résultats de simulation de protocole ExOR ainsi que d'ExOR hiérarchique.

### 4.4.1 Le choix de simulateur Matlab

Lors de notre évaluation de performance, on a utilisé Matlab pour les raisons suivantes :

- MATLAB est un logiciel de calcul numérique produit par MathWorks. Il est disponible sur plusieurs plateformes [26].
- MATLAB est un langage simple et très efficace, optimisé pour le traitement des matrices, d'où son nom. Pour le calcul numérique, MATLAB est beaucoup plus concis que les vieux langages (C, Pascal, Fortran, Basic) et pour la programmation, il optimise le code des programmes en utilisant des fonctions pré définies. Nous pouvons traiter la matrice comme une simple variable [26].
- MATLAB contient une interface graphique puissante, et on peut l'enrichir en ajoutant des « boîtes à outils » (toolbox) qui sont des ensembles de fonctions supplémentaires, profilées pour des applications particulières (traitement de signaux, analyses statistiques, optimisation, etc.) [26].
- MATLAB contient également un langage de programmation de haut niveau dans lequel nous retrouvons la majorité des concepts des langages de programmation modernes (types Pascal et C.). L'ordre d'exécution des instructions est déterminé par des structures de contrôle. Il permet aussi la création de fonctions et distingue les données locales des données globales. Ces avantages ont rendus de MATLAB, un langage de programmation et de simulation très sollicité [26].

### 4.4.2 Métriques de performances

Afin de mesurer l'efficacité énergétique du protocole ExOR et ExOR hiérarchique, on va se focaliser sur les points suivants :

- **Energie consommée :**

Dans les RCSFs, la plus part des approches visent à minimiser la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie du réseau, afin de remédier au problème de la charge de batterie de ses nœuds capteurs à cause de leurs tailles et de leurs zone de déploiement. De ce fait, la contrainte d'énergie est le paramètre le plus étudié lors de la validation.

- **Durée de vie du réseau :**

La durée de vie du réseau est comme étant la durée d'épuisement des nœuds capteurs par unité de temps jusqu'à la mort du premier nœud, de même pour un pourcentage de 50% soit la moitié du reseau, ainsi que pour le dernier nœud dans le réseau (soit jusqu'à la mort du dernier nœud).

- **Taux Moyen de Livraison de Paquets de données ( TMLP ) :**

Le taux de livraison de paquets (TLP) est le rapport entre le nombre de parquets délivrés avec succès à la station de base à celui émis par les noeuds sources. Cette métrique nous permet d'avoir une idée sur les performances du protocole en termes de routage et son degré de succès pour fournir les paquets de données captées à la station de base. Mathématiquement TLP est donné par [18] :

$$TLP = \frac{\text{Le nombre de paquets reçus par la station de base}}{\text{Le nombre de paquets émis par les noeuds sources}} \quad (4)$$

- **Le délai moyen de bout en bout (DBBM) :**

Le délai de bout en bout (DBB) est exprimé par la moyenne des différences entre le temps de réception d'un paquet de donnée au niveau du nœud destinataire et le temps de son émission par le nœud source, pour tous les paquets de données bien reçus dans le réseau.

$$DBB = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Temps de réception du paquet}(i) - \text{Temps d'émission du paquet}(i)}{\text{Nombre total de paquets reçus}} \quad (5)$$

DBB est un critère déterminant dans les réseaux de capteurs car il permet à l'utilisateur d'intervenir rapidement à l'occurrence d'un événement. Ce délai inclut tous les retards causés lors de l'établissement des routes, mise en mémoire tampon ainsi que les retards de retransmission au niveau de la couche MAC lors d'une collision. Alors, le délai moyen de bout en bout est donné par la somme de l'DBB de tous les paquets transitant dans le réseau sur le nombre total d'exécutions du scénario de simulation :

$$DBBM = \frac{\sum_{i=1}^n DBB(i)}{n} \quad (6)$$

### 4.4.3 Paramètres de simulation

Après avoir présenté les grandes lignes du principe de fonctionnement du protocole ExOR, nous allons à présent effectuer une évaluation des performances dans le but d'évaluer la consommation énergétique des deux protocoles de routage opportuniste : ExOR et ExOR Hiérarchique dans un RCSF, pour ce faire on a défini l'environnement de simulation suivant dont les paramètres sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Valeurs
Superficie	100m <sup>2</sup>
Nombre de capteurs	150
Rayon de captage	20m
Energie initiale des capteurs	0.2 joule
Déploiement des capteurs	aléatoire
Taille des paquets de donnée	Varie entre 1 et 256 octets

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation

En ce qui concerne la configuration de la machine sur le quel a été exécuté Matlab, elle est dotée des caractéristiques suivantes :

Paramètres	Valeurs
System d'exploitation	Windows 7 professionnel
Processeur	Intel Core i3
RAM	4 Gb
Disque dur	300 Gb

TABLE 4.2 – Caractéristiques de la machine

#### 4.4.4 Résultat de la simulation

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

Parmi les métriques prise en compte, on trouve la moyenne d'énergie consommée et la durée de vie du réseau, les autres métriques non pas pus être simulé faute de temps.

— **Moyenne d'énergie consommée :**

La figure ci-dessous illustre la consommation énergétique moyenne des 150 nœuds capteurs pris en compte pour la simulation des deux protocole ExOR et ExOR hiérarchique sur une période de temps de simulations de 500 itérations.

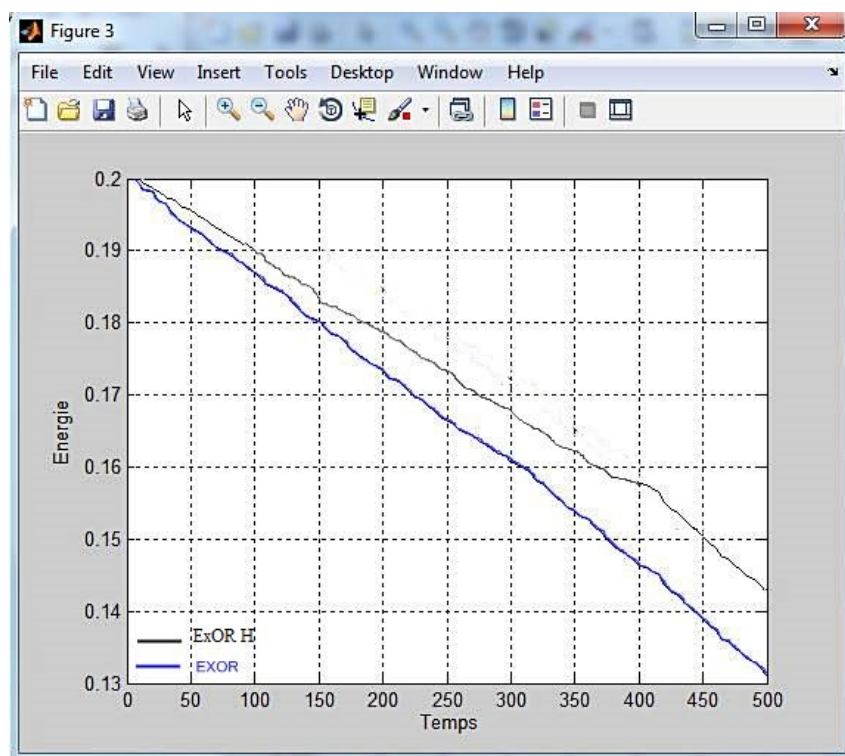


FIGURE 4.3 – Moyenne d'énergie consommée

Le protocole ExOR hiérarchique donne des résultats considérés en termes de réduction d'énergie par rapport à ExOR pour un nombre de nœuds inférieurs à 150. Nous expliquons ceci par le fait qu'avec ExOR hiérarchique, en utilisant les clusters, plus précisément les CHCs, ce dernier en collaboration avec son CHA, les charges deviennent moins lourde, donc le CHC consomme moins d'énergie contrairement au CH dans le routage hiérarchique par exemple. Le nombre de diffusions des paquets a pu être réduit car le nombre de relayeurs à diminuer, de ce fait, le coût des chemins de reliaje sera minimiser d'où la réduction considéré dans la consommation d'énergie.

— **Durée de vie du réseau :**

Pour pouvoir étudier la durée de vie du réseau en fonction du nombre de nœuds déployés, nous avons suivi l'évolution des 150 nœuds. La figure (4.4) présente la durée de vie du réseau en fonction du temps représenté par le nombre d'itérations.

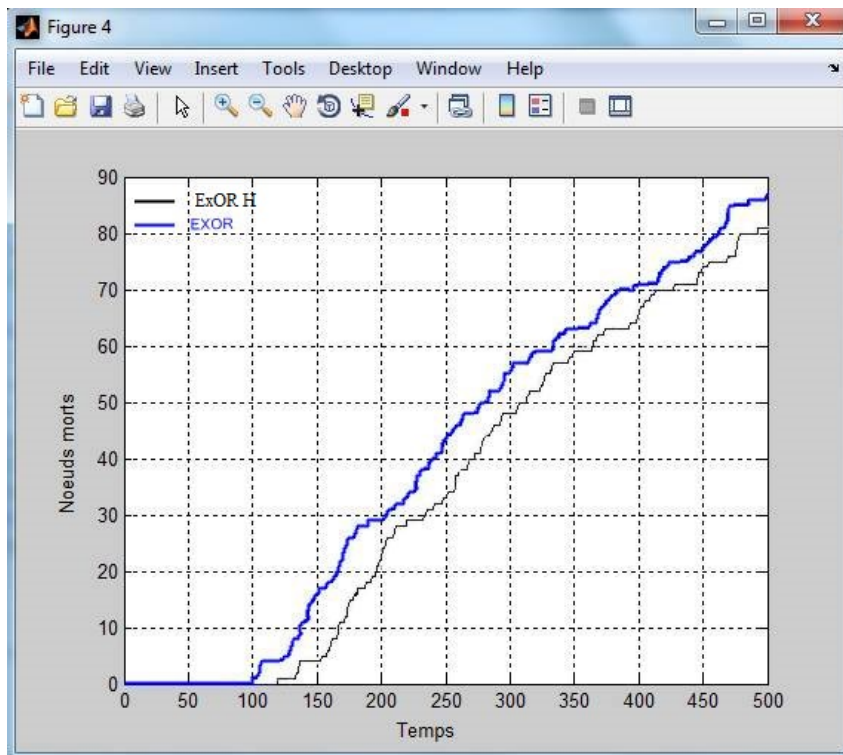


FIGURE 4.4 – Durée de vie du réseau

La durée de vie du réseau offerte par notre protocole ExOR hiérarchique est acceptable, l'explication à cela est qu'il permet d'allonger la durée de fonctionnement des capteurs en retardant comme on le constate sur les deux courbes le moment où les nœuds commencent à mourir. Dans ExOR la mort du premier capteur commence à partir de  $T = 100$  tandis que pour ExOR hiérarchique à partir de  $T = 122$ . Cette amélioration se répercute sur toute la courbe d'où la conclusion que ExOR hiérarchique permet d'augmenter la durée de vie du réseau entier.

## — Délai moyen de bout en bout :

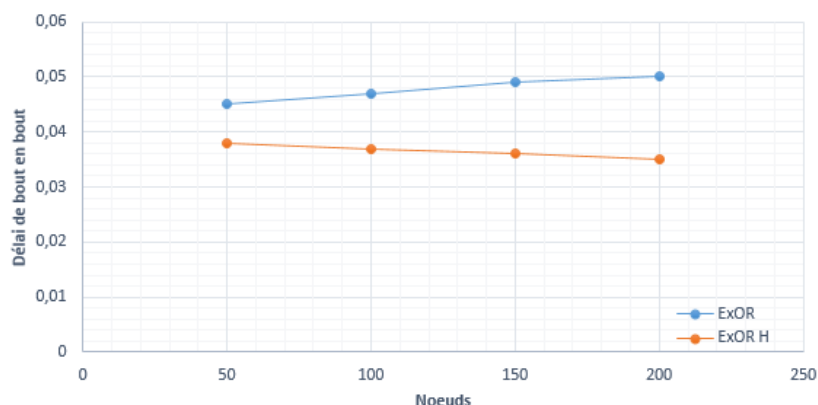


FIGURE 4.5 – Délai de bout en bout

La figure (4.5) montre les deux protocoles ExOR et ExOR H expriment en moyenne le délai de transmission de bout en bout pour acheminer les paquets de données à la station de base avec un léger avantage pour le protocole ExOR H par rapport à ExOR. Cet avantage marqué par le protocole ExOR H revient au fait que celui-ci utilise le concept de clustering qui permet de réduire le nombre de transmission d'où le délai générale de transmission d'un paquet de donnée.

Les résultats obtenus sur les deux courbes sont l'accumulation de plusieurs résultats de chaque simulation faites sur un nombre de nœuds différents : soit (50, 100, 150, 200). L'interprétation de ces résultats, qui, sous forme de courbe nous permet de visualiser l'amélioration en termes de délai de bout en bout de notre protocole ExOR H par rapport au protocole ExOR.

## 4.5 Conclusion

Nous avons développés un protocole opportuniste ExOR hiérarchique qui s'adapte à des applications de type réseau de capteurs ayant un certain nombre de capteurs déployées autour d'une station de base, tel que chaque nœud est responsable de la gestion de sa quantité d'énergie et des interactions avec son environnement. L'efficacité énergétique de notre protocole est dû au fait que le nombre de diffusions avait diminué. Ceci est le résultat des la répartition du réseau en clusters et la coordination des CHCs et de leurs CHAs, ainsi que l'ETX en terme de consommation d'énergie pour établir une route de moindre coût vers la station de base.

Les résultats de simulation obtenus permettent d'entrevoir le gain d'énergie dans notre protocole ExOR Hiérarchique. L'efficacité énergétique de celle-ci a été démontrée en comparant ses performances avec ExOR. Cette efficacité est obtenue grâce au fait que, notre protocole utilise une politique de gestion de réseau qui lui permet d'équilibrer le niveau d'énergie de différents nœuds, par conséquent, prolonger la vie du réseau.



## Conclusion générale et perspectives

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont une nouvelle technologie qui a surgit après les grands progrès technologique concernant le développement des capteurs intelligents, des processeurs puissants et des protocoles de communication sans fil. Ce type de réseau composé de centaines ou de milliers d'éléments, a pour but la collecte de données de l'environnement, leur traitement et leur dissémination vers le monde extérieur.

A travers les recherches que nous avons effectué durant ce projet et les travaux qui ont été réalisés, nous avons constaté l'importance des RCSFs dans le domaine pratique et beaucoup plus dans le domaine de recherche. Les RCSFs présente un important intérêt dans plusieurs domaines très sensibles, à savoir ; médicaux, militaires, environnementaux, etc.

Beaucoup de travaux ont été menés par les chercheurs dans ce domaine, ce qui explique, l'existence de plusieurs protocoles de routage destinés à bien gérer la communication, en minimisant : l'énergie consommée par les capteurs ainsi que le temps de propagation des données et avoir une bonne qualité de service.

La plupart des études antérieures dans le domaine des RCSFs ont mis l'accent sur des mécanismes traditionnel de routage, les protocoles dont ils disposent sont généralement caractérisés par un faible débit de données, un faible coût et une faible consommation énergétique. Afin de remédier à tous ces problèmes, un nouveau concept de routage appelé le routage opportuniste est apparu pour bénéficier de tous les avantages offerts.

Le routage opportuniste tire son bénéfice de l'exploitation de son environnement, d'où on trouvent plusieurs de ses avantages a savoir l'augmentation de fiabilité et la qualité de transmission ainsi qu'une bonne optimisation d'énergie qui est le résultat de détermination efficace des nœuds relais.

Dans notre mémoire, l'étude que nous avons consacré à ce concept ainsi que ses protocoles nous a permis d'avoir une large idée sur le routage opportuniste, où nous avons pu concevoir le protocole opportuniste ExOR hiérarchique qui est le résultat d'une combinaison du concept de routage opportuniste et hiérarchique.

Au cours de notre travail, nous nous sommes intéressés en premier lieu à l'étude des réseaux de capteurs : leurs composants, leurs architectures, leurs caractéristiques, etc.

Puis nous avons étudié quelques protocoles de routage pour les RCSFs ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Par la suite, nous nous somme intéressé a l'intitulé de notre mémoire qui est le routage opportuniste où nous avons définis ce routage et illustré ces composants, puis nous avons dressé une classification que nous avons jugé a la fois convenable et conforme.

Enfin nous avons listé la plupart des protocoles de routage opportunistes.

Dans le dernier chapitre, nous avons proposé un nouveau protocole basé sur ce nouveau concept de routage combiné à un autre mécanisme pour une optimisation de l'énergie.

Ce travail, nous a aussi permis de se familiariser avec le langage Matlab, actuellement très sollicité par les informaticiens (Beaucoup de simulateurs sont créés sous Matlab).

Notre projet, bien que les objectifs soient atteints, est amené à évoluer, ce qui laisse la place aux perspectives suivantes :

- Ils restent beaucoup de travaux à mener sur les réseaux de capteurs à savoir des solutions pour minimiser la consommation d'énergie.
- Introduire le principe de clustering avec un cluster head dynamique.
- Plusieurs autres perspectives semblent se dessiner pour le cas des réseaux de capteurs sans fil, à savoir, la sécurité qui est un facteur très important dans les RCSFs.

# Bibliographie

- [1] A. Abins and N. Duraipandian. Survey on opportunistic routing protocols in wireless networks. *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 2015.
- [2] M. Anuradha and G. Ganapathy. Optimistic opportunistic routing techniques for wireless sensor networks. Technical report, Bharathidasan University, 2013.
- [3] L. babu and P. Balasubramanie. A survey on opportunistic routing protocols. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2014.
- [4] K. BARKA. *Une plate-forme Middleware pour le prototypage des réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de M'sila, 2011.
- [5] A. BERRACHEDI and A. DIARBAKIRLI. *Sécurisation du protocole de routage hiérarchique LEACH dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Ecole nationale Supérieure d'Informatique Oued-Smar Alger, 2009.
- [6] K. BEYDOUN. *Conception d'un protocole de routage hierarchique pour les reseaux de capteurs*. PhD thesis, l'université de Franche-Compte, 2009.
- [7] D. Boubiche. *Protocole de routage pour les reseaux de capteur sans fil*. PhD thesis, Université de l'Hadj Lakhdar-Batna, 2008.
- [8] N. BRAHIM. *Routage multichemin securise pour un reseau de capteur sans fil video*. PhD thesis, Université d'Oran, 2012.
- [9] A. Bunel. Les réseaux de capteurs sans fil, 2007.
- [10] K. T. Chahrazad and B. Wiam. Implémentation et test d'un protocole de prévention de l'attaque clone dans un réseau de capteurs sans fil. Master's thesis, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2014.
- [11] S. CHELLOUG. *Optimisation d'énergie dans les algorithmes de routage pour réseaux mobile*. PhD thesis, Université Constantine 2, 2007.
- [12] A. CHOUHA. *Traitement et Transfert d'images Par Réseau de Capteurs sans Fil*. PhD thesis, Université Hadj Lakhder Batna, 2011.
- [13] A. Darehshoorzadeh, L. Cerda-Alabern, and V. Pla. Opportunistic routing in wireless mesh networks. *springer science and business media*, 2013.
- [14] E. DHIB. Routage avec qos temps réel dans les réseaux de capteurs. Technical report, Ecole superieur des communications de Tunis, 2007.
- [15] A. B. Djawhara Benchaira. *Sécurité de la déssimination de données dans un réseau de capteur sans fil : cas du protocole Tiny Diffusion*. PhD thesis, Ecole national superieure d'informatique Oued-Semar Alger, 2009.
- [16] T. DUCROCQ and M. HAUSPIE. clustering pour l'optimisation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil. *Université de Lille 1*, 2012.

- 
- [17] P. Jadhav. A survey on opportunistic routing protocols for wireless sensor networks. *Elsevia journal, procedia computer science*, 2016.
- [18] M. KHELIFI. *Optimisation de la consommation de l'énergie et maximisation de la durée de vie des réseaux capteurs sans fil*. PhD thesis, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, 2008.
- [19] N. KHOULALENE. *Regroupement avec équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, 2007.
- [20] H. Liu, B. Zhang, H. T. Mouftah, X. Shen, and J. Ma. Opportunistic routing for wireless ad hoc and sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2009.
- [21] L. Loiseau. *De l'exploitation des réceptions opportunistes dans les mécanismes de relayage pour les réseaux sans-fil*. PhD thesis, l'Université de Rennes 1, 2013.
- [22] S. MAYANK, S. YASHAWANT, and K. NAGESH. Opportunistic routing in wireless sensor networks : A comparative analysis. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 2014.
- [23] H. MEKIDICHE. La géolocalisation de réseaux capteurs (algorithme dvhop ). Master's thesis, Université de Tlemcen, 2011.
- [24] S. MOAD. La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Master's thesis, Université de Rennes 1, 2008.
- [25] A. MOURADIAN. *Proposition et vérification formelle de protocoles de communications temps-réel pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Ecole doctorale Lyon, 2013.
- [26] S. OUARET and M. ATMANI. Amélioration du protocole de routage gossiping dans les réseaux de capteurs. Master's thesis, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, 2008.
- [27] D. H. P SPACHOS, L SONG. Performance comparaison of opportunistic routing shemes in wireless sensor networks. *University of toronto Canada*, 2011.
- [28] R. Poonkuzhali, M. Y. Sanavullah, A. Sabari, and T. Dhivyaa. A survey on opportunistic routing in mobile ad hoc networks. *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, 2015.
- [29] M. SAYAD. *Energy Efficient Protocol (EEP) : un protocole de routage efficace en énergie pour réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Ecole nationale Supérieure d'Informatique Oued-Smar Alger, 2009.
- [30] A. Triviño-Cabrera and S. Cañadas-Hurtado. Survey on opportunistic routing in multihop wireless networks. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 2011.

## *Résumé*

Le routage opportuniste est un nouveau mécanisme de routage qui prend en compte l'exploitation de son environnement. Il utilise le concept de diffusion qui caractérise les réseaux sans fil pour acheminer convenablement les paquets. Au lieu de choisir un nœud de relais spécifique à chaque transmission, le routage opportuniste diffuse le paquet à un ensemble de nœuds candidats. Puis, les candidats, qui ont reçu avec succès le paquet, exécutent un protocole de coordination pour choisir le meilleur chemin afin d'expédier le paquet. Le protocole opportuniste que nous avons développé, EXOR-Hiérarchique, se base sur le protocole opportuniste ExOR avec une structure hiérarchique du réseau. Notre protocole offre un contrôle plus facile de la topologie de réseau, cela permet un cheminement à la fois facile et rapide. Les résultats de l'évaluation des performances montrent que le protocole proposé prouve son efficacité dans la conservation de l'énergie et de la prolongation de la durée de vie du réseau.

**Mots clés :** Réseaux de capteurs, routage opportuniste, clustering, ExOR, Energie.

## *Abstract*

The opportunist routing is a new mechanism of routing which takes the exploitation of its environment. It uses the concept of diffusion which characterizes the wireless networks to route the packages suitably. Instead of choosing a specific node of relay has each transmission, the opportunist routing diffuses the package with a whole of nodes candidates. Then, the candidates, who received successfully the package, carry out a protocol of coordination to choose the best in order to dispatch the package. The opportunistic protocol that we developed, EXOR-Hierarchical, is based on the opportunistic protocol ExOR with a hierarchical structure of the network. Our protocol offers an easier control of the network topology that is at the same time easy and fast advance. The results of performance evaluation show that the proposed protocol has proven its effectiveness in conserving energy and extending the life of the network.

**Keywords :** Wireless sensor networks, opportunistic routing, clustering, ExOR, Energy.