



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université Ahmed Draya d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LATECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Thème

*Une nouvelle technique pour la
minimisation de la consommation
d'énergie dans le RCSF*

Présenté par :

-Benhessine keltoum

- Lansari Amal

Membres de jury :

Président: Mr

Université d'ADRAR

Encadreur : Mr Kaddi Mohammed

Université d'ADRAR

Examineur : Mr

Université d'ADRAR

Année universitaire 2020/2021

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne populaire et démocratique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAYA - ADRAR

BIBLIOTHÈQUE CENTRALE

Service de recherche bibliographique

N°B.C/S.R.B//U.A/2021



جامعة احمد دراية - ادرار

المكتبة المركزية

مصلحة البحث البليوغرافي

الرقم: م.م/م.ب.ب/اج.أ/2021

شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذة(ة): فاخر محمد

المشرف مذكرة الماستر.

الموسومة بـ:
une nouvelle technique pour la
minimisation de la consommation d'énergie de
Res

من إنجاز الطالب(ة): بت صيت كلثوم

والطالب(ة): لاتصاري امل

كلية: علوم وتكنولوجيا

القسم: علوم وتكنولوجيا

التخصص: حوسبة الكتلين

تاريخ تقييم / مناقشة: 20 جوان 2021

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين
النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.
يُمكنهم إيداع النسخ الورقية (02) والإلكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

د. فاخر محمد

ادرار في: 04 JUL 2021.

مساعد رئيس القسم:

و. مصطفى خان

مساعد رئيس قسم علوم التكنولوجيا بكلية بالتدريس
والتعليم في التخصص تقنية الحاسوب والتكنولوجيا
الدراسات - كلية العلوم والتكنولوجيا

ملاحظة: لاتقبل أي شهادة بدون التوقيع والمصادقة.

Résumé

Les capteurs sans fil sont conçus pour fonctionner pendant des mois, voire des années. Ainsi, la capacité énergétique des capteurs doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du réseau. L'objectif de ce mémoire est de minimiser la consommation énergétique des nœuds capteurs pour prolonger la durée de vie et donc la durée de vie de l'ensemble du réseau. Afin d'atteindre cet objectif, nous proposons dans ce travail une solution éco-énergétique qui s'appuie sur une architecture hiérarchique en combinant les deux structures hiérarchiques : structure hiérarchique en clusters et structure hiérarchique en chaîne pour envoyer les données capturées des nœuds sources vers la station de collecte (Station de Base « puits »). Les résultats de la simulation montrent que notre solution suggérée minimise la consommation d'énergie des nœuds de capteurs et prolonge la durée de vie globale du réseau par rapport au protocole LEACH-C.

Mots-clés: Réseaux de capteurs sans fil, consommation d'énergie, Energie résiduelle, durée de vie, LEACH-C.

Abstract

Wireless sensors are designed to work for months or even years. Thus, the energy capacity of the sensors must be used efficiently in order to maximize the lifetime of the network. The objective of this memory is to minimize the energy consumption of the sensor nodes to extend the life and therefore the life of the entire network. In order to achieve this objective, we propose in this work an energy efficient solution that relies on a hierarchical architecture by combining the two hierarchical structures: hierarchical structure in clusters and hierarchical structure in chain to send the captured data from the source nodes to the collection station (Base Station "well"). The simulation results show that our suggested solution minimizes the power consumption of the sensor nodes and extends the overall network lifespan compared to the LEACH-C protocol.

Keywords: Wireless sensor networks, energy consumption, residual energy, lifespan, LEACH-C.



Remercîment

Avant toutes choses, nous tenons à remercier « **Allah** » le tout Puissant Qui nous a donné patience et persévérance pour achever notre travail.

Je remercie très vivement mon encadreur **Dr. Kaddi Mohammed** pour m'avoir conseillé et encouragé et pour m'avoir fait partager son expérience et ses connaissances.

Nous remercions aussi **Mr. Benembarek.Mebrouk**, qui n'a pas lésiné sur nous avec des informations pendant la période de stage et pour ces conseils,

Je rends honneur à tous les membres du jury pour leur acceptation de faire partie de cette commission à l'effet d'apprécier et d'évaluer objectivement notre mémoire

Enfin, je remercie notre parents et toute notre famille, mes notre pour leur soutien et leurs encouragements.



Dédicace

Avant tout nous remercions "**Allah**" tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la force pour accomplir ce modeste travail.

A mon soutien « **père** », sans ça, je ne serais pas arrivé ici, pour le goût à l'effort qu'il a suscité en moi pour tout ce qu'il a fait pour moi. Que Dieu le garde et le préserve une bonne santé et longue vie.

La personne la plus chère de ma vie « **Ma maman** » celle qui m'a mis au monde et qui n'a jamais cessé de m'entourer de son amour et sa tendresse et qui me toujours encourager.

A mon grand-mère et grand-père surtout mon grand Mère « **Lala Mati** », ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour, que ce rapport soit le meilleur cadeau que je puisse t'offrir.

A mes frères et sœurs qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'étude

A Toutes les personnes de ma famille

A tous ceux qui ont le nom de famille de '**Benhessine**'.

A tous mes amis





Dédicace

A la mémoire de mon très cher père,

A ma très chère mère,

A mes frères et soeurs,

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment,

Je dédie ce modeste travail



Table de matière

Introduction générale.....	1
<i>Chapitre 1: Généralité sur les réseaux de capteur sans fil</i>	3
1.1 Introduction	4
1.2 Un capteur.....	4
1.2.1 Définition	4
1.2.2 Type de capteur:.....	5
1.3. Capteurs sans fils	6
1.3.1 Les capteurs sans fils	6
1.3.2 Architecture d'un capteur sans fil.....	6
1.4 Réseaux de capteur sans fil.....	8
1.4.1 Définition d'un RCSFs	8
1.4.2 Architecture de RCSF	8
1.4.3 Classification des RCSF.....	9
1.5 Comparaison entre les RCSFs et réseaux Ad hoc.....	11
1.6 Pile protocolaire	12
1.7 Facteurs et contraintes des RCSF	14
1.8 Domaine d'application de RCSFs.....	16
1.8.1. Applications militaires	16
1.8.2 Applications médicales (santé).....	17
1.8.3. Applications industrielles.....	17
1.8.4. Applications écologiques	17
1.8.5 Agriculture de précision.....	17
1.8.6. Applications domotiques.....	17
1.8.7 Applications environnementales	18
1.9. Conclusion	18
<i>Chapitre 2: Technique de conservation d'énergie dans les RCSF</i>	20
2.1 Introduction	21
2.2 Notion de durée de vie d'un réseau	21
2.3 Notion de couverture et connectivité dans RCSF	22
2.3.1 Notion de la couverture dans les RCSF	22
2.3.2 Notion de la connectivité dans les RCSF.....	24
2.4 La consommation d'énergie d'un nœuds capteur	24
2.5 La facteur et Sources de surconsommation d'énergie	26
2.5.1 Surconsommation d'énergie	26
2.5.2 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie	27
2.6 Classification des techniques de conservation énergétique [43]	29
2.5.1 Approches basées sur le cycle d'activité	30
2.5.2 Approches dirigées par les données.....	31
2.5.3 Approches basées sur la mobilité	31
2.7 Conclusion.....	32
Chapitre 3: Protocoles de routages dans les RCSF	33

3.1 Introduction :	34
3.2 Le protocole :	34
3.3 Définition du routage :	34
3.4. Classification des protocoles de routages.....	35
3.4.1 Selon la structure du réseau.....	36
3.4.2 Selon le mode de fonctionnement du protocole.....	42
3.4.3 Selon le mode d'établissement des chemins.....	46
3.5 Conclusion.....	50
<i>Chapitre 4: Approche d'optimisation d'énergie dans le RCSF.....</i>	<i>51</i>
4.1 Introduction.....	52
4.2. Outils de développement.....	52
4.3 Solution proposée.....	53
4.3.1 Modèle du réseau.....	53
4.3.2 Modèle d'énergie.....	54
4.3.3 Hypothèses.....	55
4.3.4 Détail de la solution proposée.....	55
4.4 Simulation.....	57
4.4.1 Paramètres de simulation.....	57
4.4.2 Métriques de simulation.....	58
4.4.3 Résultats de simulation.....	58
4.4.3.1 Résultats.....	59
4.4.3.2 Analyses de résultats.....	61
4.5. Conclusion.....	61
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>62</i>
<i>Référence.....</i>	<i>64</i>

Liste de Figures

Figure 1. 1: Les capteurs traditionnels (a)Les micro-capteurs(b)	5
Figure 1. 2 :Architecture matériel d'un capteur sans fil.....	7
Figure 1. 3: Réseaux capteurs sans fil.....	8
Figure 1. 4: Architecture d'un réseau de capteur sans fils.....	9
Figure 1. 5: Classification des RCSFs	9
Figure 1. 6: Pile protocolaire pour les RCSFs [08].....	14
Figure 1. 7: Quelques Domaines principaux d'application de RCSFs.....	16
Figure 2. 1: Rayon de couverture et rayon de communication d'un nœud capteur	23
Figure 2. 2: Notion de k-couverture.....	23
Figure 2. 3: Exemple d'un point d'articulation	24
Figure 2. 4: La consommation d'énergie de capture, de traitement et de communication [38]	26
Figure 2. 5: L'écoute abusive dans une transmission [44].....	28
Figure 2. 6: Classification des techniques de conservation d'énergie dans les RCSFs [46].	30
Figure 3. 1: Graphe représentatif du routage, dans un réseau de 7 nœuds.	35
Figure 3. 2: Diagramme de classification des protocoles de routages.	36
Figure 3. 3: Topologie plate	37
Figure 3. 4: Topologie hiérarchique.....	39
Figure 3. 5: topologie basé sur la localisation	41
Figure 3. 6: illustration du protocole GAF.....	42
Figure 3. 7: Fonctionnement de protocole SPIN	44
Figure 3. 8: phases du protocole de diffusion dirigée. (a) propagation de l'intérêt. (b).....	46
Figure 3. 9 : Illustration de protocole PEGASIS	47
Figure 3. 10: Clustering hiérarchique dans TEEN et APTEEN.....	49
Figure 4. 1: Modèle du réseau de notre solution proposée.....	54
Figure 4. 2 : Le modèle de l'énergie utilisé.....	55
Figure 4. 3: Zone de simulation (Déploiement des capteurs dans le réseau).....	59
Figure 4. 4 : Résultats de simulation de notre solution	60
Figure 4. 5 : Résultats de simulation de protocole LEACH[C].....	60

Liste de Tableau

Tableau 1. 1: Quelques exemples de capteurs et leurs différentes propriétés [6].....	5
Tableau 1. 2: Comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux hd hoc [17].....	11
Tableau 3. 1: Comparaison des protocoles de routage de RCSF	49
Tableau 4. 1 : Caractéristiques de l'ordinateur utilisé.....	53
Tableau 4. 2 : Paramètres de simulation utilisés.....	57

Table des acronymes

RCSF :	Réseaux de Capteurs Sans Fil
APTEEN:	Adaptive Periodic TEEN.
ADV:	Advertising
DARPA:	Defense Advanced Research Projects Agency
DD:	Directed Diffusion.
GPS:	Global Positioning System
GAF	Géographic Adaptative Fidelity
LEACH:	Multi Group based Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy.
LEACH –C:	low-energy Adaptative Clustering Hierarchy-centralized
MAC:	Media Access Control.
MANET:	Mobile Ad hoc Networks
PEGASIS:	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
QOS :	Routage basé sur la qualité de service
RR:	Rumour Routing
SB:	Station de Base.
SAR:	Sequential Assignment Routing.
SPIN:	Sensors Protocols for Information via Negotiation
TTL :	Time To Live
TEEN:	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network.
WSN:	Wireless Sensor Network

Introduction générale

Depuis leur création, les réseaux de communication sans fil ont connu un succès sans cesse croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles. Grâce à ses divers avantages, cette technologie a pu s’instaurer comme acteur incontournable dans les architectures dérivées, telles que : le réseau cellulaire, le réseau local sans fil et autres. Durant cette dernière décennie, une nouvelle architecture a vu le jour : le réseau de capteurs sans fil.

Ce type de réseau est né de la fusion entre les systèmes embarqués et les communications sans fil. Un RCSF (“WSN : Wireless Sensor Network” en Anglais) est un réseau Ad hoc composé d’un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs qui peuvent être déployés de façon aléatoire ou déterministe dans une zone d’intérêt donnée. Ces nœuds capteurs sont capables de récolter plusieurs paramètres physiques sur l’environnement qui les entoure, appelé généralement zone de captage (ou zone de surveillance). Ensuite, ils doivent si nécessaire traiter les données capturées et les transmettre à un (ou plusieurs) nœud de collecte appelé station de base, centre de traitement (“sink” en Anglais). Beaucoup de domaines d’applications tels que le contrôle et suivi environnemental, le contrôle de production dans l’industrie, la surveillance de zone, le monitoring de l’habitat, l’agriculture intelligente, etc. sont basés sur les RCSF. Les nœuds capteur sont alimentés par des piles et qui sont, soit posés à un endroit précis, soit dispersés aléatoirement (souvent déployés par voie aérienne à l’aide d’avions ou hélicoptères). Afin de résister aux déploiements, ces capteurs doivent être très solides et de plus, ils doivent aussi pouvoir survivre dans les conditions les plus extrêmes dictées par leur environnement d’utilisation (feu ou eau par exemple). En plus des contraintes environnementales, une contrainte très importante est l’économie de batterie. En effet, un réseau de capteurs ne peut survivre si la perte de nœuds est trop importante car ceci engendre des pertes de communication dues à une trop grande distance entre les capteurs. Donc il est très important que les batteries durent le plus longtemps possible étant donné que dans la plupart des applications ils sont placés aléatoirement (impossible de retourner changer les batteries). Pour prolonger la durée de vie d’un réseau de capteur sans fil tout en assurant les trois tâches principales d’un nœud capteur: capture, traitement et communication, il faut bien conserver l’énergie des nœuds capteurs. Parmi ces trois tâches, la communication est la tâche qui consomme la plus grande partie de l’énergie. Ceci a motivé notre travail à se focaliser sur deux techniques de conservation d’énergie dans ce niveau.

L'objectif principal de notre travail est la minimisation de consommation de l'énergie des nœuds capteurs pour prolonger la durée de vie et donc la durée de vie de réseau entier. Pour cela, nous avons conçu une solution qui se base sur une architecture hiérarchique en combinant les deux structures hiérarchiques: structure hiérarchique en clusters et structure hiérarchique en chaîne afin d'orienter les données collectées de nœuds sources vers la station de collecte (puits)

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons un présenter généralité sur les Réseaux de capteur sans fil, définition, leurs architectures, leur classification, pile protocolaire et contraintes qui influencent la conception de ce type de réseaux puis en fait une comparaison entre les RSCF et réseaux ad hoc ainsi que les différents domaines d'applications.

Dans le deuxième chapitre, Technique de conservation d'énergie dans les RSCF en définissant la durée de vie d'un réseau de capteur et la notion de couverture et connectivité puis nous allons présenter les facteurs intervenants et source de surconsommation d'énergie

Dans Le troisième chapitre, nous allons étudier quelques protocoles de routage de réseau de capteur et leur classification, ensuite nous mettons dans un tableau la comparaison entre ces protocoles.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons notre modèle du réseau dans lequel notre solution proposée est opérationnelle

Chapitre 1: Généralité sur les réseaux de capteur sans fil

Sommaire

1.1 Introduction

1.2 Capteur

1.3 Capteur sans fil

1.4 Réseau de capteur sans fil

1.6 Comparaison entre le RCSFs et réseau ad hoc

1.7 Pile protocolaire

1.8 Facteur et contrainte de conception d'un RCSFs

1.9 Domaines d'application de RCSFs

1.10 Conclusion

1.1 Introduction

Les développements des technologies micro-capteurs et des communications sans fil à l'émergence d'un nouveau type de réseaux sans fil appelée réseaux de capteurs sans fil (RCSF ou Wireless Sensor Network), ce dernier constitue un intérêt croissant en termes de leur facilité, leur souplesse de déploiement, et leur faible coût. Ce qui permet à ces types de réseaux d'être plus exploités dans un grand nombre d'applications et nombreux domaines tels que le domaine militaire, médical, et la domotique...

Dans ce présent chapitre, nous allons faire une généralité sur les Réseaux de capteur sans fil, définition, leurs architectures, leur classification, leurs, pile protocolaire et contraintes des réseaux de capteurs sans fil puis en fait une comparaison entre les RCSF et réseaux ad hoc ainsi que les différents domaines d'applications.

1.2 Un capteur

1.2.1 Définition

Un capteur est un dispositif réagissant à un stimulus, comme la chaleur, l'humidité ou la lumière. Son principe est de transformer l'état d'une grandeur physique observée (la pression, etc.) en une grandeur utilisable [2] (intensité électrique, position d'un flotteur) en générant un signal qui peut être mesuré ou interprété. Pour cela, il possède au moins un transducteur dont le rôle est de convertir une grandeur physique en une autre. . Nous avons deux formes de capteurs, les capteurs « traditionnels » (figure 1.2.1 (a)) et « les micro-capteurs » (figure 1.2.1 (b)) [2] qui diffèrent principalement au niveau de leurs fonctionnements (niveau d'intelligence) et de leurs dimensions. On parle alors de capteur intelligent.

Un capteur intelligent :

Le terme *capteur intelligent* (smart sensor ou intelligent sensor) a été utilisé dans l'industrie des capteurs pour désigner des capteurs qui ne fournissent pas seulement des mesures, mais aussi une fonctionnalité aux mesures spécifiques [3]. Par rapport à un capteur classique, un capteur intelligent intègre de nombreux éléments électroniques additionnels, ainsi que des unités programmables et des aspects logiciels nécessaires au traitement des données, aux calculs, à la communication numérique [4]. Il est donc caractérisé par [3] sa capacité à effectuer une collecte des mesures, les traiter et à les communiquer au monde extérieur.

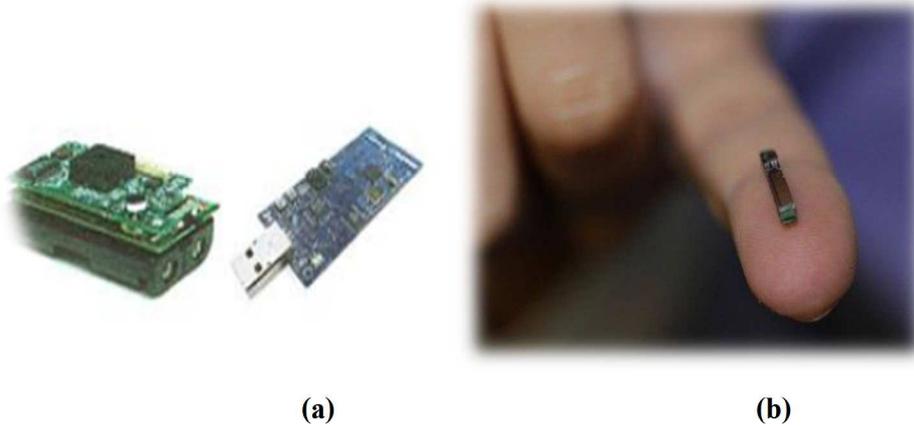


Figure 1. 1: Les capteurs traditionnels (a) Les micro-capteurs (b)

1.2.2 Type de capteur:

Il existe actuellement un grand nombre de capteurs, avec des fonctionnalités diverses et variées. La plupart des capteurs dépendent de l'application pour laquelle ils ont été conçus (capteurs aquatiques, sous-terrain, etc.) [5]

Depuis un peu plus de 10 ans, la technologie des capteurs sans fil a beaucoup évolué. Les modules deviennent de plus en plus petits et les durées de vie prévues augmentent.

Le tableau suivant résume quelques exemples de capteur et leurs différentes propriétés:

Tableau 1. 1: Quelques exemples de capteurs et leurs différentes propriétés [6].

Type de Nœud	Telos (Intel [Web17]) 	Mica2 (Berkeley [Web18]) 	SunSPOT (Sun [Web19]) 	Imote2 (Crossbow [Web20]) 
Type de Micro contrôleur	8 Mhz, 8 bits	7.37 Mhz, 8 bits	180 Mhz, 32 bits	13-416 Mhz, 16 bits
RAM	2 Ko	4 Ko	512 Ko	256 Ko
ROM	256 Ko	512 Ko	4 Mo	32 Mo
Bande passante	250 Kbps	38.4 Kbps	250 Kbps	250 Kbps
Capacité de la batterie	Coin cell 1000 mAh	2xAAA 5700 mAh	Rechargeable 750 mAh	3xAAA 3750 mAh
Portée maximale (m)	100	150-300 m	100	100
Radio	Chipcon CC2420 2.4GHz 250 Kbps IEEE 802.15.4	Chipcon CC1000 315/433/33/868/91 6 Mhz 38.4 Kbauds	Chipcon CC2420 2.4GHz 250 Kbps IEEE 802.15.4	Chipcon CC2420 2.4GHz 250 Kbps IEEE 802.15.4
Système	TinyOS	TinyOS	Squawk	TinyOS

Chapitre 1: Généralité sur les réseaux de capteur sans fil

d'exploitation			(Machine virtuelle Java)	
Connexion au PC	Port série	Carte de Programmation	Interface USB	Interface USB

1.3. Capteurs sans fils

1.3.1 Les capteurs sans fils

Les capteurs sont des dispositifs de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées, autonomes, capable de traiter des informations et de les transmettre, via les ondes radio, à une autre entité (capteurs, unité de traitements...) sur une distance limitée à quelques mètres. [7]

1.3.2 Architecture d'un capteur sans fil

1.3.2.1 Architecture matérielle

Suivant le type d'application, il existe une multitude de capteurs sur le marché : les capteurs de température, d'humidité, de pression, etc. Cependant, malgré cette diversité apparente, ils restent dotés d'une architecture matérielle similaire. Un capteur est composé principalement d'une unité de : captage, traitement, stockage, communication, et énergie. Des composants additionnels peuvent être ajoutés selon le domaine d'application [8], comme par exemple un système de localisation tels qu'un GPS (Global Positioning System), un générateur d'énergie (exemple : cellules solaires) ou un mobilisateur lui permettant de se déplacer. Ces éléments principaux et optionnels (représentés par les traits discontinus) sont visibles sur la figure I.1-

- **Unité de capture: (unité d'acquisition es donnés) (Sensing Unit) (mécanisme de localisation...)**

Elle permet de capter le phénomène observé et le convertir depuis un signal analogique en un numérique. Il sera, ensuite, fourni à l'unité de calcul. [9]

- **Unité de traitement (Processing Unit) :**

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. [9]

- **Unité de communication (Transceiver Unit) :**

Elle est chargée d'exécuter toutes les émissions et les réceptions de données. [9]

- **Unité de contrôle d'énergie(Batterie) (Power Unit) :**

Chapitre 1: Généralité sur les réseaux de capteur sans fil

Elle effectue des opérations de contrôle de l'énergie restante et de mesure de la durée de vie du capteur. [9]

- **Système de localisation (Location Finding System) :**

Il fournit des informations sur la localisation requise par les techniques de routage. [9]

- **Unité de mobilité (Mobilizer) :**

Il est appelé si le nœud capteur doit être déplacé pour accomplir la requête à traiter. -
Générateur d'énergie (Power Generator) : Il récupère l'énergie de l'environnement extérieure tel que l'énergie solaire puisque le capteur se laisse pendant des mois et même durant des années sans l'intervention humaine. [9]

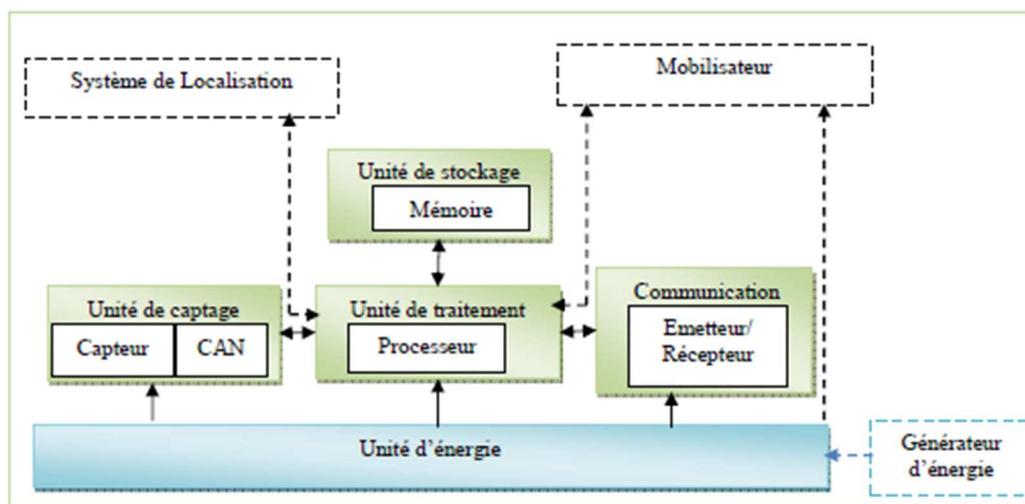


Figure 1. 2 : Architecture matériel d'un capteur sans fil

1.3.2.2 Architecture logiciel :

En plus des plateformes matérielles et des standards, plusieurs plateformes logicielles ont été également développées spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil. La plateforme la plus répandue est le TinyOS, qui est un système d'exploitation open source conçu pour les RCSF [10].

En plus de TinyOS, plusieurs plateformes logiciel et systèmes d'exploitation ont été introduits récemment, comme LiteOSou CONTIKI par exemple. Tandis que plusieurs systèmes d'exploitation avec des capacités supplémentaires sont devenus disponibles, TinyOS est toujours employé couramment dans la recherche sur les RCSF, une des raisons principales de cette popularité est le vaste espace de code établi dans toutes les solutions développées.

1.4 Réseaux de capteur sans fil

Avec les avancées techniques en terme de performances et de miniaturisation, réalisées dans les microsystèmes électromécanique (MEMS : microcontrôleur, transcrire RF...) et les communications sans fil, une nouvelle variante de réseaux ad hoc: Les réseaux de capteurs sans fil. Les réseaux de capteurs sans fil, dans la dernière décennie, ont attiré un grand nombre de chercheurs et d'industriels pour leur intérêt, et ont apporté des solutions dans un grand nombre d'applications. Nous donnons dans ce qui suit la définition d'un RCSF, ses composants, ces classifications,

1.4.1 Définition d'un RCSFs

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) ou Wireless Sensor Network (WSN) est un réseau informatique composé de petits dispositifs autonomes, axés ou dispersés aléatoirement dans une zone d'intérêt [11], utilisant des capteurs coopérant pour surveiller des conditions environnementales ou physiques, comme la température, le son, les vibrations, la pression, le mouvement, etc.

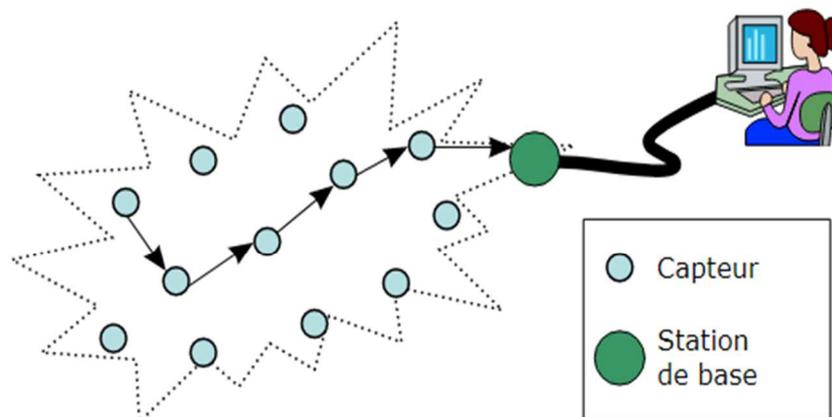


Figure 1. 3: Réseaux capteurs sans fil

1.4.2 Architecture de RCSF

L'architecture d'un RCSF est généralement représentée par un nuage qui est en réalité un ensemble de capteur éparpillé dans une zone géographique nommé zone de captage, sachant que chaque nœud a la capacité de collecter des données et de les router vers la station de base via une structure sans fil multi-sauts, et la station de base à son tour les transmet par satellite ou par internet vers l'utilisateur final pour analyser ces données et prendre des

Chapitre 1: Généralité sur les réseaux de capteur sans fil

décisions. L'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes au réseau de capteurs [12].

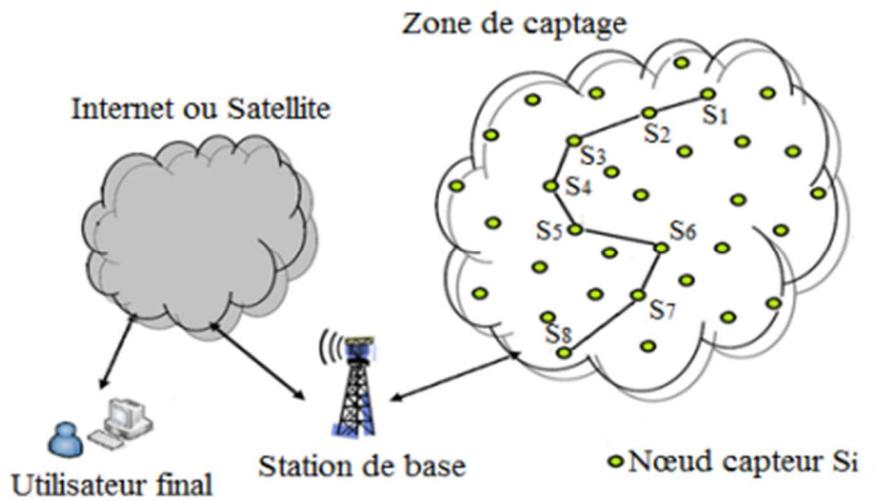


Figure 1. 4: Architecture d'un réseau de capteur sans fils.

1.4.3 Classification des RCSF

Il existe plusieurs critères pour classifier les réseaux de capteurs [10 13 14]. En effet, pour chaque type d'application, ces réseaux ont des caractéristiques différentes. Ils se distinguent par le mode d'acquisition et de livraison des données au puits, la distance entre les nœuds capteurs et le puits, le modèle de mobilité dans le réseau, les capacités des nœuds du réseau, etc.

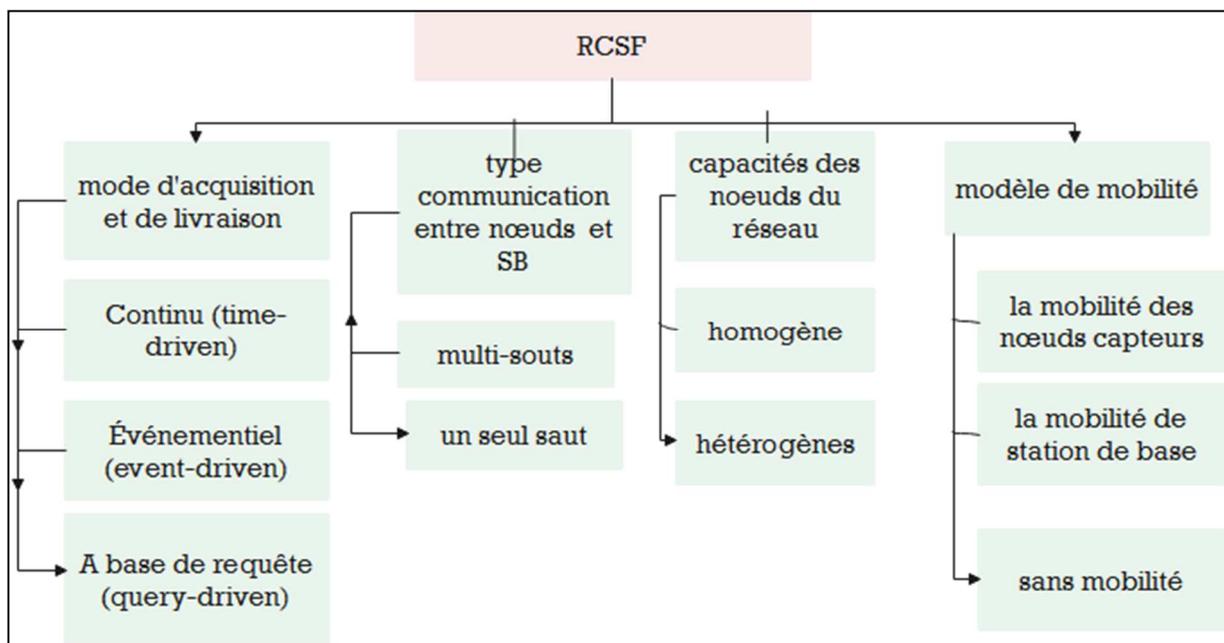


Figure 1. 5: Classification des RCSFs

1. Selon le mode d'acquisition et de livraison des données au puits

Dans les réseaux de capteurs, le modèle d'acquisition et de livraison des données au puits dépend de l'application et de ses exigences. Il peut être :

- Continu (*time-driven*)
- Événementiel (*event-driven*)
- à base de requête (*query-driven*)
- Hybride.

Dans le modèle continu, les nœuds doivent périodiquement (intervalle de temps constant) réveiller leurs émetteurs pour envoyer les données captées au puits. Le type d'application visé concerne les applications de type "surveillance" où le but principal est d'avoir une information régulière de la zone surveillée. Dans le modèle orienté événements, les capteurs envoient leurs mesures seulement lorsqu'il y a un événement qui se produit. Ce type de modèle est recommandé pour les applications de surveillance d'événements critiques où le but principal est l'obtention d'une information sur l'événement le plus rapidement possible. Dans le modèle orienté requêtes, les capteurs mesurent des phénomènes et stockent ces mesures dans leur mémoire. Ils envoient ces mesures seulement lorsqu'ils reçoivent des requêtes de la station de base. Le modèle hybride est une combinaison des trois modèles précédents.

2. Selon la distance entre les nœuds capteurs et le puits

Dans cette classification, on distingue les réseaux multi-sauts (multi-hop WSN) des réseaux à un seul saut (Single-hop WSN). Dans un réseau de capteur à un simple saut, les nœuds capteurs sont dans le voisinage immédiat du puits. Ils envoient alors leurs données captées directement au puits sans passer par aucun autre nœud intermédiaire. Dans le réseau de capteur multi-sauts, la distance entre les quelques nœuds capteurs et le puits dépasse leur portée maximale. Pour envoyer leurs données au puits, ils doivent le faire par l'intermédiaire d'autres nœuds. Ce type de réseau a une large gamme d'application mais est difficile à mettre en œuvre [14].

3. Selon le modèle de mobilité dans le réseau

Cette classification consiste en une combinaison entre la mobilité des nœuds capteurs et celle du puits. Par cette combinaison, nous pouvons distinguer deux grandes catégories de réseaux : *réseaux statiques* et *réseaux dynamiques ou mobiles* (static and mobile networks). On peut par exemple avoir un réseau constitué d'un ensemble de nœuds capteurs mobiles et d'un puits fixe (réseau à puits statique et à nœuds capteurs mobiles).

Chapitre 1: Généralité sur les réseaux de capteur sans fil

Le but de tels réseaux est la plupart du temps l'exploration de zones inaccessibles ou dangereuses. Un autre exemple est un réseau constitué de capteurs fixes servant à la surveillance d'occurrence d'événements sur une zone géographique et d'un puits fixe (réseau statique).

4. Selon les capacités des nœuds du réseau

Dans cette classe, on distingue les réseaux homogènes des hétérogènes [14, 15].

Dans un réseau de capteurs homogène, tous les nœuds du réseau (nœuds capteurs, le(s) puits, les passerelles) ont les mêmes capacités du point de vue énergie, calcul et stockage. Alors que, dans un réseau de capteurs hétérogène il y a quelques nœuds sophistiqués qui ont plus de capacité de traitement et de communication que les nœuds normaux. Cela améliore l'efficacité énergétique et prolonge la vie de réseau. L'avantage d'un tel réseau est que ces nœuds sophistiqués peuvent être utilisés pour exécuter les tâches plus complexes comme les coordinateurs, les chefs du cluster (cluster Head), etc. Son inconvénient est qu'il est difficile de mettre en place un tel réseau du fait qu'au moins chaque type de nœuds du réseau aura un code (programme) propre à lui. Ce qui augmente le coût de développement.

1.5 Comparaison entre les RCSFs et réseaux Ad hoc

Les RCSFs et réseaux ad hoc (ou MANET, pour Mobile Ad hoc Networks) [16] partagent quelques points communs mais quelques fois avec un point différents. Le tableau 1.5 résume les similitudes et les différences entre ces deux types de réseaux:

Tableau 1. 2: Comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc [17].

	Réseau de capteur sans fil	Réseau ad hoc
Points similitudes	<ul style="list-style-type: none">✓ Utilisation d'un médium sans fil.✓ Déploiement ad hoc.✓ Robuste aux pannes des nœuds (auto organisation). Routage multi-saut.	
Points différents	1. Les nœuds collaborent pour remplir un objectif.	1. Chaque nœud a son propre objectif.
	2. Flot de données « many-to-one ».	2. Flot « any-to-any ».
	3. L'énergie est un facteur déterminant.	3. Le débit est majeur
	4. Utilisation du broadcast.	4. Communication point à point.
	5. La mobilité des nœuds est restreinte.	5. La mobilité des nœuds.

Chapitre 1: Généralité sur les réseaux de capteur sans fil

	6. Grand nombre de nœuds (de l'ordre de mille).	6. Nombre de nœuds moyen (de l'ordre de cents).
	7. Les nœuds ont une basse capacité de traitement et de stockage	7. Les nœuds ont une grande capacité de traitement et de stockage.
	8. Un objectif ciblé	8. Générique/ communication.
	9. Data-centrique: souvent pas d'adresses uniques, les requêtes sont envoyés à tous les nœuds.	9. Adresse-centrique: une adresse unique pour chaque nœud utilisée pour réaliser la communication entre les nœuds.

1.6 Pile protocolaire

La pile protocolaire utilisée par le nœud puits (station de base) ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par la figure 7. Cette pile prend en charge le problème de consommation d'énergie, intègre le traitement des données transmises dans les protocoles de routage, et facilite le travail coopératif entre les capteurs [08]. Elle est composée de la couche application, transport, réseau, liaison de données, physique, ainsi que de trois niveaux qui sont : le niveau de gestion d'énergie, de gestion de tâches et le niveau de gestion de mobilité [18].

- **La couche physique**

La couche physique spécifie les caractéristiques matérielles, les techniques de modulation, la détection de porteuse, la conversion des signaux numériques, analogiques, optiques [19].

- **La couche liaison de donnée**

La couche liaison de donnée permet de contrôler la liaison logique. Elle permet aussi de spécifier comment les données sont expédiées entre deux paires de nœuds capteurs avec une distance d'un saut. Ainsi, le protocole MAC de cette couche liaison permet de gérer l'accès au support physique en évitant les collisions causées souvent par l'accès concurrentiels à ce médium physique. Cette couche est également responsable du multiplexage des données et du contrôle des erreurs de transmission. En outre, elle assure la liaison point à point et multipoint du réseau dans les RCSF [19].

- **La couche réseau**

Le rôle principal de la couche réseau est de router les données fournies par la couche transport de façon fiable jusqu' à la station de base, tout en essayant d'optimiser au mieux la consommation énergétique induite par l'ensemble des nœuds capteurs participant à ce routage [19].

- **La couche transport**

Chapitre 1: Généralité sur les réseaux de capteur sans fil

La couche transport est chargée du transport fiable des données et du contrôle de flux. Pour bien mener ces fonctions, elle divise les données issues de la couche application du nœud source en segments avant leur envoi dans le réseau. Du côté du récepteur, ces données issues de la couche réseau sont réordonnées et réassemblées avant d'être envoyées à la couche application. Cette couche peut également gérer les files d'attente des paquets avant leurs transmissions à la couche réseau [19].

- **La couche application**

La couche application est la couche la plus haute. Elle assure l'interfaçage avec les applications. Ainsi, suivant le type de nœud capteur, différents types d'applications peuvent être mises en œuvre. Cette couche gérée directement par les logiciels utilisateurs est le niveau le plus proche des utilisateurs. La couche application peut également gérer l'agrégation des données avant leur transfert à la couche transport. Le rôle de chacun des différentes couches de gestion est décrit dans les paragraphes suivants [19].

- **La couche de gestion de l'énergie**

La couche de gestion de l'énergie contrôle l'utilisation de la batterie. Par exemple, après la réception d'un message, le module radio du nœud récepteur peut être éteint afin que ce dernier puisse économiser son énergie. En outre, si le niveau d'énergie d'un capteur donné devient très faible (généralement en dessous d'un seuil donné), alors ce nœud peut diffuser une alerte à l'ensemble de ses voisins afin de les informer qu'il ne peut plus participer au routage, ce qui peut renforcer la tolérance aux pannes. L'énergie résiduelle de ce nœud pourra ainsi être réservée pour d'autres fonctions, par exemple le captage [19].

- **La couche de gestion de la mobilité**

La couche de gestion de la mobilité permet de détecter et d'enregistrer le mouvement d'un nœud capteur donné dans la zone d'intérêt. Un retour arrière vers l'utilisateur est toujours conservé et le nœud peut garder des traces sur l'ensemble ses nœuds voisins. Avec les informations sur l'état de ses voisins, les nœuds capteurs peuvent mieux coordonner et gérer l'utilisation de leur énergie pour la réalisation de leurs différentes tâches [19].

- **Plan de gestion de tâches**

Le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau, afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, ce qui permet de prolonger la durée de vie du réseau [20].

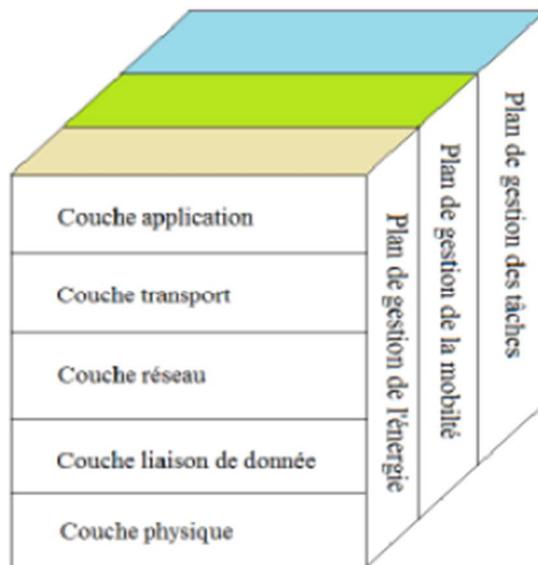


Figure 1. 6: Pile protocolaire pour les RCSFs [08]

1.7 Facteurs et contraintes des RCSF

La conception d'un réseau de capteur sans fil engendre beaucoup de contraintes :

- **Durée de vie du réseau**

C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années [08].

- **Limite de communication**

Les capteurs opérants à bas débits au temps de transfert des données entre les capteurs pour minimiser l'énergie consommée. Un débit réduit n'est pas handicapant pour le réseau [23].

- **Le coût de production**

Le coût d'un simple nœud est important pour la mise en point du coût global du réseau. Si le coût du réseau de capteur sans fil est plus cher qu'un réseau classique alors cette nouvelle technologie ne serait pas rentable en conséquence, le coût de chaque nœud doit être le plus bas possible, par exemple le prix d'un seul capteur ne doit pas atteindre 1\$ [13] [08].

- **Topologie dynamique**

La topologie des réseaux de capteurs peut changer au cours du temps pour les raisons suivantes [08]

- Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (champ de bataille par exemple), la défaillance d'un nœud capteur est, donc très probable.

Chapitre 1: Généralité sur les réseaux de capteur sans fil

- Un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie.
- Dans certaines applications, les nœuds capteurs et les stations de base sont mobiles.

- **Limite le coût du capteur**

Les coûts des capteurs actuellement sont beaucoup élevés. Il est relatif au nombre de fonctionnalités qu'il dessert. Par exemple, si on veut ajouter le système GPS (Global Positioning System), un mobilisateur ou un système qui génère l'énergie selon les applications, le coût de chaque unité s'ajoute au coût global de capteur [21].

- **Passage à l'échelle (scalabilité)**

Le nombre de capteurs peut être varié de quelque entité à plusieurs donc le réseau doit pouvoir l'organiser à une grande échelle quel que soit le nombre. Les protocoles de RSCF doivent être capables de fonctionner et d'adapter selon le nombre des nœuds [21].

- **Sécurité physique limitée**

Les réseaux de capteurs sans-fil sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé [08].

- **Environnement**

Les RSCF sont souvent déployés dans des milieux hostiles, par conséquent ils doivent être conçus d'une manière à résister aux sévères conditions de l'environnement [08].

1.8 Domaine d'application de RCSFs

La large gamme des types de capteur disponibles (thermique, optique, vibration,...), leur taille réduite, et leur coût de plus en plus faible Sans oublier le support sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteur d'envahir plusieurs domaines d'application. Parmi elles, nous citons :



Figure 1. 7: Quelques Domaines principaux d'application de RCSFs

1.8.1. Applications militaires

Le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. En effet, les différents avantages qu'offrent ces réseaux qui sont entre autres le déploiement rapide, le coût réduit des équipements, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes qui rendent ce type de réseaux très appréciable dans le domaine militaire. Un réseau de capteurs déployé dans un champ de bataille dans un secteur stratégique ou dans une zone difficile d'accès, ceci permet par exemple de surveiller tous les mouvements de l'ennemi ou d'analyser le terrain (détection de mines, d'agents chimiques, biologiques, des radiations, etc.) avant de déployer des troupes. Ainsi, beaucoup de projets dans le domaine des RCSF ont été lancés dans le but d'aider des unités militaires et pour protéger des villes contre des attaques telles que les menaces terroristes, etc. Dans ce cadre, nous pouvons citer le projet DSN (Distributed Sensor Network) [22] de la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) qui a été l'un des premiers projets dans les années 80 ayant utilisé les réseaux de capteurs pour le rassemblement de données distribuées en vue d'une exploitation.

1.8.2 Applications médicales (santé)

Le champ de contrôle de santé (Health monitoring) représente un grand marché pour les réseaux de capteurs sans fil qui a tendance à croître très rapidement. Ces réseaux de capteurs peuvent être avalés ou implantés sous la peau. Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que: la tension artérielle, le rythme cardiaque, ... à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière [23].

1.8.3. Applications industrielles

L'intégration des micro-capteurs dans un processus de stockage et de livraison de marchandises peut être utilisée pour connaître la position, l'état et la position de direction d'un paquet ou d'une charge. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré [23]

1.8.4. Applications écologiques

L'utilisation des réseaux de capteurs pour optimiser la consommation des ressources énergétique peut avoir une conséquence environnementale positive. Un exemple de ce type d'application est l'intégration de plusieurs micro-capteurs dans le système de climatisation et le chauffage des immeubles. Ainsi, la climatisation ou le chauffage ne sont déclenchés qu'aux endroits où il ya des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire. Le système distribué peut aussi maintenir une température homogène dans les pièces. Utilisée à grande échelle, une telle application permettrait probablement de réduire la demande mondiale en énergie [23].

1.8.5 Agriculture de précision

Les réseaux de capteurs sont capables d'apporter des bénéfices considérables dans le domaine d'agriculture, grâce à leur habilité de surveiller les taux de pesticides dans l'eau, le degré d'érosion du sol, détection des parasites et le niveau de pollution de l'air en temps réel [23].

1.8.6. Applications domotiques

La domotique est un domaine d'application dans lequel les RCSF émergent de plus en plus. Des 22 RCSF peuvent être déployés pour le "monitoring" de l'habitat et les nœuds capteurs forment ainsi un environnement intelligent permettant de fournir toutes les

Chapitre 1: Généralité sur les réseaux de capteur sans fil

informations nécessaires aux applications de confort, de sécurité et de maintenance de cet habitat. Dans de telles applications, les capteurs sont généralement des capteurs de détection de présence, des capteurs de sons, des caméras de capteurs sans fil, etc. Dans d'autres applications, des systèmes domotiques de chauffage, de climatisation, d'éclairage ou de distribution d'eau pourraient aider à optimiser l'efficacité grâce à des nœuds capteurs présents dans des tuiles, des murs des immeubles, etc. Un RCSF déployé dans de telles applications peut ainsi former une « maison intelligente », autonome et capable de comprendre les situations en fonction du comportement des occupants, et d'en déduire des actions qui peuvent aider à une prise de décision efficace et en temps réel. [20].

1.8.7 Applications environnementales

Les réseaux de capteurs sans fil sont aussi largement utilisés dans le secteur environnemental [24], comme, nous allons le voir ci-dessous :

- La détection de feux de forêts.
- La détection d'inondations et de tremblements de terre.
- Le contrôle de l'environnement marin (capteurs acoustiques).
- Les études de pollution.
- La recherche météorologique ou géophysique.
- Agriculture de précision : On trouve aussi l'utilité de ces réseaux dans la surveillance de niveau de pesticides dans l'eau potable, le niveau d'érosion du sol et le niveau de pollution atmosphérique.
- L'exploration planétaire.

1.9. Conclusion

Les réseaux de capteurs restent une nouvelle technologie peu accessible au grand public. Elle est principalement répandue dans les laboratoires de recherches. Des progrès sont encore à réaliser dans ce domaine. Néanmoins ils correspondent à une certaine vision du futur et permettront des améliorations dans d'innombrables domaines de la vie quotidienne. A cette politique,

Nous avons vu dans ce chapitre les concepts généraux liés aux réseaux de capteurs sans fil. Leurs architectures, la pile protocolaire des capteurs. Et leur classification. Et la comparaison entre les RCSFs et réseaux Ad hoc. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs contraintes compliquent la gestion de ce type de réseaux. ; Enfin leurs domaines d'application.

Chapitre 1: Généralité sur les réseaux de capteur sans fil

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

Chapitre 2: Technique de conservation d'énergie dans les RCSF

Sommaire

2.1 Introduction

2.2 Notion de la durée de vie d'un réseau de capteur

2.3 Notion couverture/ connectivité

2.4 Source de surconsommation d'énergie

2.5 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

2.6 Technique de conservation de l'énergie dans les RCSF

2.7 Conclusion

2.1 Introduction

La consommation d'énergie est un problème fondamental lorsque les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles ou encore déployés sur de grands espaces. Pour cela, les nœuds limités en termes d'énergie vont avoir un impact sur la durée de vie du réseau tout entier. Augmenter la durée de vie du réseau sans augmenter la capacité des batteries signifie réduire la dépense d'énergie des nœuds.

Et l'importance du thème de la consommation d'énergie dans les réseaux RCSF et l'impossibilité de remplacer les batteries des nœuds dans les zones, Nous étudie dans ce chapitre la technique de conservation d'énergie dans les RCSF

2.2 Notion de durée de vie d'un réseau

Un réseau ne peut accomplir son objectif que tant qu'il est en vie, mais pas au delà. La durée de vie prévue est critique dans tout déploiement de réseau de capteurs. Le but des scénarios applicatifs classiques consiste à déployer des nœuds dans un domaine sans surveillance pendant des mois ou des années. La vie d'un réseau de capteurs correspond à la période de temps durant laquelle le réseau peut, selon le cas : maintenir assez de connectivité, couvrir le domaine entier, ou garder le taux de perte d'information en-dessous d'un certain niveau.

La durée de vie du réseau dépend fortement de la durée de vie nodale. Cette dernière représente une métrique d'évaluation des performances très importante aussi bien dans les réseaux de capteurs que les réseaux Ad Hoc [25]. La vie nodale correspond à la durée de vie d'un des nœuds du réseau. Cette durée de vie dépend essentiellement de deux facteurs : l'énergie consommée en fonction du temps et la quantité d'énergie qui lui reste. La durée de vie moyenne \bar{E} d'un nœud continuellement actif est calculée comme suit [25]

$$\bar{E} = \frac{E}{P}$$

Où : P est la puissance de transmission et E est l'énergie résiduelle du nœud.

Pour la durée de vie du réseau il existe deux définitions principales :

- Pour certains elle représente le temps écoulé jusqu'à qu'un premier nœud tombe en panne [26] [27],
- Pour d'autres c'est la durée jusqu'à ce qu'il reste au plus une certaine fraction de nœuds survivants dans le réseau [28]. Dans la suite de ce manuscrit nous utiliserons la première définition.

2.3 Notion de couverture et connectivité dans RCSF

Un réseau de capteurs sans fil déployé dans une zone dure et difficile d'accès, la durée de vie de ce réseau dépend fortement du facteur connectivité entre ses nœuds. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine d'une rupture de connectivité, entre les nœuds de ce réseau, tels que le manque d'énergie au niveau d'un nœud important, infection d'un nœud vital par un code malveillant, une défaillance logique ou physique d'un nœud primaire etc. La défaillance d'un nœud capteur laisse une partie (ou toute sa zone) sans couverture, et peut engendrer le partitionnement du réseau si c'est un nœud passerelle (un nœud de relais), ce qui veut dire diviser le réseau en deux ou plusieurs sous réseaux où certains nœuds peuvent, également, être déconnectés du réseau global. Ce qui implique une perte de connectivité entre les parties de ce dernier.

2.3.1 Notion de la couverture dans les RCSF

La notion de couverture a été déjà utilisée dans d'autres domaines. L'exemple le plus célèbre est celui du problème de galerie d'arts (*art gallery problem* [29]). Il s'agit en effet de déterminer le nombre d'observateurs nécessaires pour couvrir une salle de galerie d'arts de telle manière que chaque point de la salle soit observé par au moins un observateur. Ce problème a plusieurs applications telles que le placement optimal d'antennes dans les communications sans fil. Le problème de galerie d'arts fut résolu d'une façon optimale dans un espace à deux dimensions et il s'est avéré difficile à calculer dans un espace à trois dimensions. La notion de couverture dans le contexte des RCSF peut avoir de sémantiques tout à fait nouvelles. La question principale, qui est au cœur de ce concept de couverture, est celle qui consiste à se poser la question de savoir comment les nœuds capteurs doivent observer bien l'espace physique. Les références [30] et [31] présentent plusieurs formulations pour traiter la couverture dans un RCSF.

Le rayon effectif de couverture des capteurs attachés aux nœuds capteurs (désignés par r dans la Figure 2.1), définit l'espace de couverture du nœud capteur qui est souvent représenté graphiquement par un cercle ou un rectangle. La couverture du réseau mesure le degré de couverture de l'espace d'intérêt (à couvrir) par l'ensemble des nœuds capteurs. Par exemple, avec une couverture partielle, seulement une partie de l'espace d'intérêt est couverte par les nœuds capteurs. Avec une couverture dense, l'espace d'intérêt est complètement couvert ou presque et avec une couverture redondante, de multiples capteurs couvrent la même localisation physique. Le degré réel de couverture est

Chapitre 2: Technique de conservation d'énergie dans les RCSF

déterminé principalement par la précision de l'observation et de la redondance nécessaire. La couverture peut varier d'un endroit à un autre au sein de l'espace d'intérêt. Par exemple, un déploiement très dense de nœuds capteurs dans certaines zones sensibles est privilégié par rapport à d'autres zones moins sensibles. Le degré de couverture influence également les algorithmes de traitement d'informations.

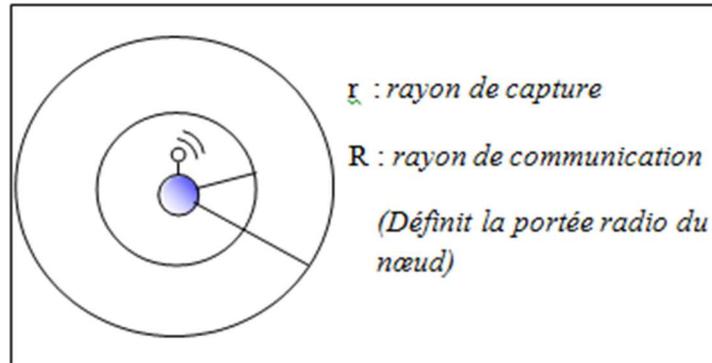


Figure 2. 1: Rayon de couverture et rayon de communication d'un nœud capteur

Ainsi, une meilleure couverture est la clé pour les systèmes robustes et peut être exploitée pour étendre significativement la durée de vie du réseau en basculant les nœuds redondants en mode économie d'énergie (i.e. veille).

La Figure 2. 2 illustre le concept de k-couverture introduit dans [32]. Ainsi, si une zone ou une cible tout entière est couverte par un capteur, alors le RCSF offre 1-couverture. Si chaque point de la zone est couvert par au moins k capteurs, alors le RCSF assure dans ce cas k-couverture. Le réseau peut également assurer 1-couverture partielle ou k-couverture partielle.

On note enfin que le notion de couverture dans la littérature prend plusieurs formes : couverture de zone, couverture de cible et couverture de frontière.

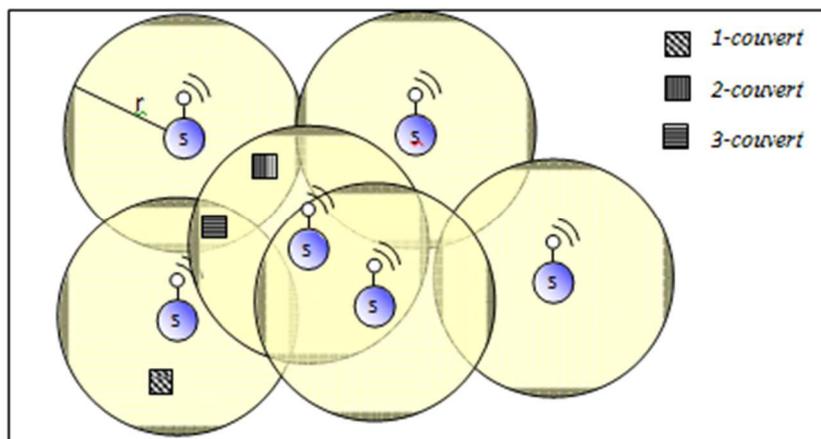


Figure 2. 2: Notion de k-couverture

2.3.2 Notion de la connectivité dans les RCSF

Un réseau est dit connecté si chaque nœud peut communiquer avec n'importe quel autre nœud du réseau, directement ou en utilisant des nœuds intermédiaires (communication multi-sauts). Il est parfois utile d'envisager des formes plus puissantes de connectivité, comme la k -connectivité. Un réseau est dit k -connecté, s'il y a au moins k chemins disjoints entre deux nœuds quelconques, un tel réseau reste connecté, même si $k-1$ nœuds tombent en panne. Un réseau k -connecté ($k \geq 2$) présente une meilleure tolérance aux pannes qu'un réseau 1-connecté. La k -connectivité permet de prolonger la durée de vie du réseau en cas de défaillance de nœuds [36]. La connectivité est affectée par les changements de topologie dus à la mobilité, la défaillance de nœuds, les attaques, etc. Ce qui a pour conséquences : la perte de liens, l'isolement des nœuds, le partitionnement du réseau, etc. La 1-connectivité est une condition fondamentale pour que le réseau soit opérationnel

Le figure Montre un exemple d'un point d'articulation qui est susceptible de générer un situation de non connectivité dans un graphe

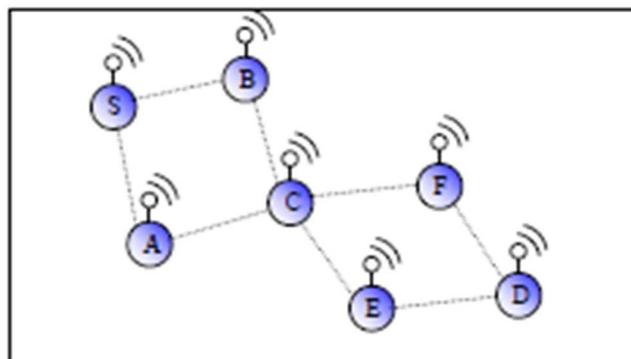


Figure 2. 3: Exemple d'un point d'articulation

2.4 La consommation d'énergie d'un nœud capteur

La consommation d'énergie est un problème fondamental. Les nœuds-capteurs sont alimentés principalement par des batteries. Ils doivent donc fonctionner avec un bilan énergétique frugal. En outre, ils doivent le plus souvent avoir une durée de vie de l'ordre de plusieurs mois, voire de quelques années, puisque le remplacement des batteries n'est pas une option envisageable pour des réseaux avec des milliers de nœuds

L'énergie consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations suivantes de capture, de traitement et de communication [34]

- **L'énergie de capture**

Chapitre 2: Technique de conservation d'énergie dans les RCSF

L'énergie de capture est la partie énergétique dépensée par un nœud capteur lorsque celui-ci effectue les opérations d'échantillonnage, de conversion analogique/numérique et d'activation de son module de capture. Le coût de cette énergie dépend du type spécifique du capteur (image, son, température, etc.) et des opérations précédentes. Cette énergie est en général très faible par rapport à la quantité énergétique totale consommée par un nœud capteur donné.

- **L'énergie de traitement**

L'énergie de traitement d'un nœud capteur représente la quantité énergétique dépensée par celui-ci pendant les opérations de lecture et d'écriture en mémoire. Cette énergie est scindée en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel. L'énergie de fuite représente l'énergie dissipée lorsque le processeur n'effectue aucun traitement. L'énergie de traitement est relativement faible par rapport à l'énergie dépensée durant la communication.

- **Energie de communication**

L'énergie de communication d'un nœud capteur est divisée en deux parties : l'énergie dépensée durant la transmission de données (TX) et celle dépensée pendant la réception de données (RX). Cette énergie dépend non seulement de la quantité des données à transmettre (taille des paquets) mais également de la distance entre l'émetteur et le récepteur et le type du module de communication utilisé. En effet, la portée d'un signal dépend non seulement de sa puissance d'émission (TX power) mais également des propriétés physiques du milieu de propagation. Cependant, la puissance d'émission influe grandement sur la portée du signal. Ainsi, lorsque la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée, et par conséquent l'énergie consommée sera plus importante. L'énergie de communication représente la plus grande partie de l'énergie consommée par un nœud capteur.

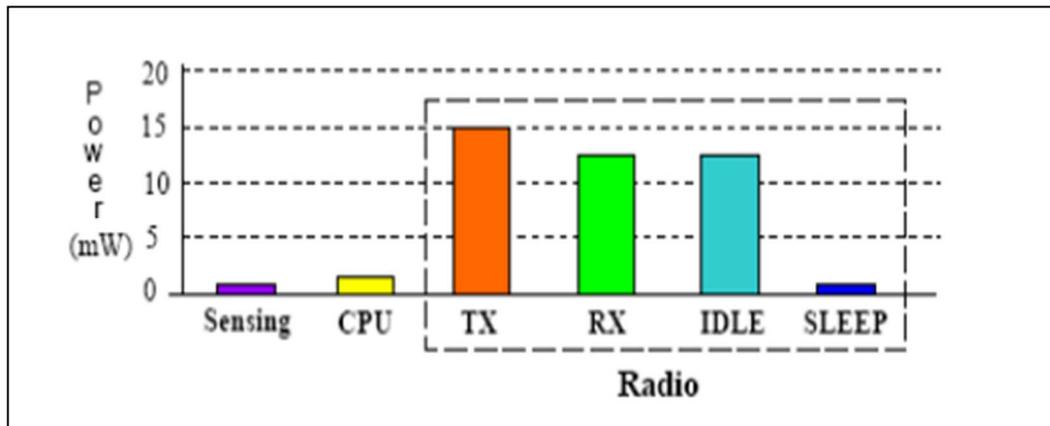


Figure 2. 4: La consommation d'énergie de capture, de traitement et de communication [35]

2.5 La facteur et Sources de surconsommation d'énergie

2.5.1 Surconsommation d'énergie

Nous appelons surconsommation d'énergie toute consommation inutile que l'on peut éviter au lieu de conserver l'énergie d'un nœud-capteur. Les sources de cette surconsommation sont nombreuses, elles peuvent être engendrées lors de la détection lorsque celle-ci est mal gérée (par exemple par une fréquence d'échantillonnage est mal contrôlée) [36]. La surconsommation concerne également la partie communication. En effet, cette dernière est sujette à plusieurs phénomènes qui surconsomment de l'énergie surtout au niveau MAC où se déroule le contrôle d'accès au support sans fil. Certains de ces phénomènes sont les causes majeures de la perte d'énergie et ont été recensés dans [39, 37, 38] :

- **Les collisions** : elles sont la première source de perte d'énergie. Quand deux trames sont émises en même temps et se heurtent, elles deviennent inexploitables et doivent être abandonnées. Les retransmettre par la suite, consomme de l'énergie. Tous les protocoles MAC essaient à leur manière d'éviter les collisions. Les collisions concernent plutôt les protocoles MAC avec contention.
- **L'écoute à vide (idle listening)** : un nœud dans l'état idle est prêt à recevoir un paquet, mais il n'est pas actuellement en train de recevoir quoi que ce soit. Ceci est coûteux et inutile dans le cas des réseaux à faible charge de trafic. Plusieurs types de radios présentent un coût en énergie significatif pour le mode idle. Eteindre la radio est une solution, mais le coût de la transition entre les modes consomme également de l'énergie, la fréquence de cette transition doit alors rester raisonnable.
- **L'écoute abusive (overhearing)** : cette situation se présente quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. Le coût de l'écoute abusive peut être un facteur dominant

Chapitre 2: Technique de conservation d'énergie dans les RCSF

de la perte d'énergie quand la charge de trac est élevée et la densité des nœuds grande, particulièrement dans les réseaux mostly-on.

- **L'overmitting** : un nœud envoie des données et le nœud destinataire n'est pas prêt à les recevoir.
- **L'overhead des paquets de contrôle** : l'envoi, la réception, et l'écoute des paquets de contrôle consomment de l'énergie. Comme les paquets de contrôle ne transportent pas directement des données, ils réduisent également le débit utile effectif

2.5.2 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs qui sont expliqués ci-dessous:

2.5.2.1 Routage des données

Le routage des données peut avoir un impact sur la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs multi-sauts. L'acheminement des paquets d'une source à une destination se fait à travers des nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud capteur consomme de l'énergie soit pour transmettre ou relayer les données des autres nœuds. Dans ce sens, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau.

2.5.2.2 Etat du module radio

Le module radio est le composant du nœud capteur qui consomme le plus d'énergie, puisque c'est lui qui assure la communication entre les nœuds. On distingue quatre états des composants radio (transmetteur et récepteur) : actif, réception, transmission et sommeil [40].

- **Etat actif**: la radio est allumée, mais elle n'est pas employée. En d'autres termes, le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre. Cet état provoque une perte de l'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission.
- **Etat sommeil**: la radio est mise hors tension.
- **Etat transmission**: la radio transmet un paquet.
- **Etat réception**: la radio reçoit un paquet.

Il est aussi à noter que le passage fréquent de l'état actif à l'état sommeil peut avoir comme conséquence une consommation d'énergie plus importante que de laisser le module radio en mode actif. Ceci est dû à la puissance nécessaire pour la mise sous tension du module radio. Cette énergie est appelée l'énergie de transition. Il est ainsi souhaitable d'arrêter complètement la radio plutôt que de transiter dans le mode sommeil. Le changement d'état du module radio doit être géré par un protocole de la couche MAC.

2.5.2.3 Accès au medium de transmission (amira)

La couche MAC a un rôle très important pour la minimisation de l'énergie consommée. Un protocole MAC économe en énergie essaie d'utiliser le moins souvent possible le module radio. Les modules radio peuvent avoir plusieurs niveaux de consommation quand ils ne sont pas en mode émission ou réception, moins le nœud consomme moins il est réactif, c'est pour cela que les différents états existent pour assurer une flexibilité selon le degré de réactivité demandé par la couche MAC. L'utilisation inutile du module provient de six sources essentielles : la retransmission, l'écoute passive, l'écoute abusive, la surcharge, la surémission et la taille des paquets [41].

- **La retransmission**

Les nœuds capteurs utilisent généralement une seule antenne radio, cependant ils partagent le même canal de transmission. La transmission simultanée des paquets par les nœuds voisins peut engendrer des collisions. Ainsi une quantité des données transmises sera perdue. La retransmission de ses données perdues générera une perte significative de l'énergie.

- **L'écoute passive (idle listening)**

L'écoute passive du canal radio dans l'attente d'une éventuelle réception (le mode idle décrit précédemment) engendre une perte importante des capacités des nœuds en termes d'énergie. Ceci est coûteux et inutile dans le cas des réseaux à faible charge de trafic. De ce fait, basculer les nœuds capteurs en mode sommeil est une solution mais la transition entre les modes consomme également de l'énergie. Pour cette raison la fréquence de transition entre les modes doit rester raisonnable.

- **L'écoute abusive (overhearing)**

L'écoute abusive se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés figure 3.2. Le coût de l'écoute abusive peut être important dans le cas d'un réseau dense et avec une charge de trafic importante.

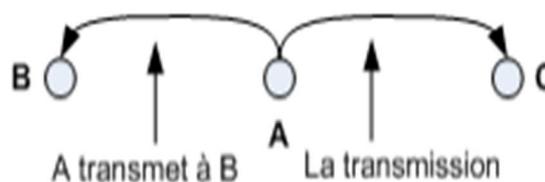


Figure 2. 5: L'écoute abusive dans une transmission [44]

Chapitre 2: Technique de conservation d'énergie dans les RCSF

Plusieurs protocoles de la couche MAC, utilisent les paquets de contrôle pour maintenir une bonne communication entre les nœuds (signalisation, connectivité, établissement de plan d'accès et évitement de collisions). L'échange de paquets nécessite une énergie additionnelle. Par ailleurs, comme ces paquets ne transportent pas directement des données, ils réduisent également le débit utile effectif.

- **La surémission (Overemitting)**

Le phénomène de surémission est produit quand des nœuds envoient des messages à des destinations qui ne sont pas prêtes à les recevoir, en effet ces messages sont considérés inutiles et consomment d'avantage de l'énergie.

- **La taille des paquets**

La taille des paquets a un effet sur la consommation d'énergie. En effet, si la taille des paquets est réduite, le nombre de paquets de contrôle échangés augmente ce qui génèrera un overhead. Dans le cas contraire, une taille grande des paquets nécessite l'utilisation d'une grande puissance de transmission.

2.2.2.4 Modèle de propagation radio

Le modèle de propagation représente une estimation de la puissance moyenne reçue du signal radio à une distance donnée d'un émetteur. La propagation du signal radio est généralement soumise à différents phénomènes: la réflexion, la diffraction et la dispersion par divers objets. Généralement, la puissance du signal reçue est de l'ordre de $(1/d^n)$, où d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, n un exposant de perte d'un chemin (Exemple : $n=2$ dans le vide, de 4 à 6 dans un immeuble) [42].

2.6 Classification des techniques de conservation énergétique [43]

Dans les applications typiques des RCSFs, les nœuds capteurs, alimentés dans la plupart des cas par des sources d'énergie embarquées (les batteries), sont souvent nombreux (des milliers) et sont en général déployés dans des environnements lointains, et hostiles. Il devient par conséquent impossible de remplacer ou de recharger leurs batteries, source primordiale pour leur survie. La métrique consommation de l'énergie est un élément fondamental dans toute conception d'un RCSFs. Les efforts de recherches qui sont et qui seront déployés dans ce sens se focalisent autour du concept économie d'énergie. La problématique autour du problème d'économie d'énergie dans les RCSFs vise essentiellement à réduire l'énergie dépensée au sein d'un nœud et au sein du réseau des nœuds capteurs en activité (protocoles réseau) dans la perspective d'étendre considérablement la durée de vie du réseau. Les

Chapitre 2: Technique de conservation d'énergie dans les RCSF

techniques d'économie d'énergie citées dans la littérature sont classifiées en général, en trois grandes classes : approches basées sur le cycle d'activité, approches dirigées par les données et approches basées sur la mobilité.

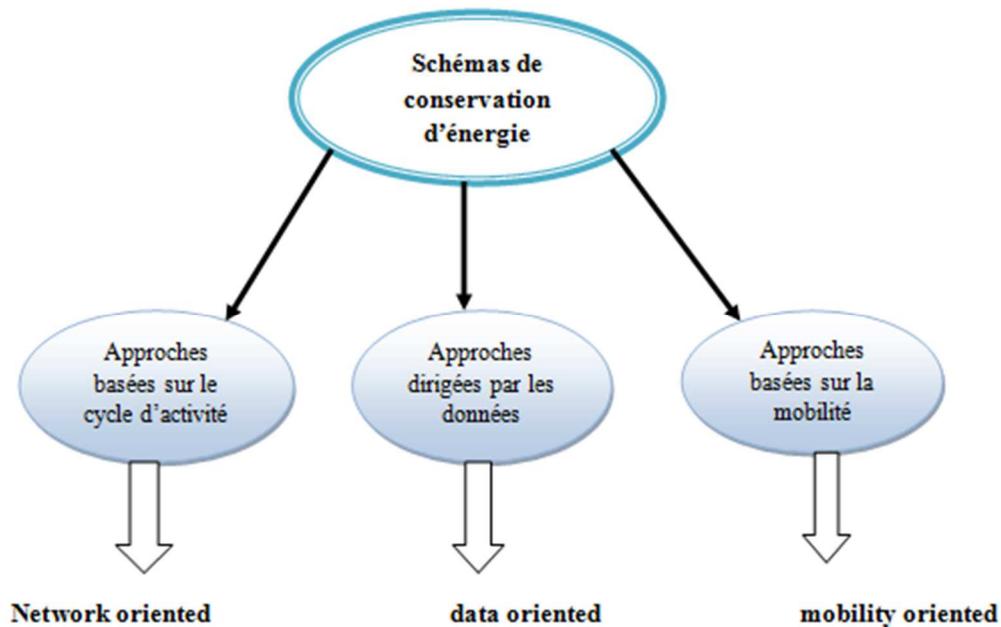


Figure 2. 6: Classification des techniques de conservation d'énergie dans les RCSFs [43].

2.5.1 Approches basées sur le cycle d'activité

Ces approches, connues dans la littérature anglaise sous le nom de « Duty Cycling approaches », concernent essentiellement les sous-systèmes radio et de traitement qui font partie de l'architecture interne d'un nœud capteur (voir figure 1.7). L'opération la plus efficace en terme de préservation d'énergie consiste à mettre en mode veille le module radio chaque fois que la communication n'est pas nécessaire. Lorsqu'il n'y a aucune donnée à envoyer ou à recevoir par le nœud capteur, le module de communication radio doit basculer vers le mode inactif et redeviendra actif chaque fois qu'il y a une présence d'une nouvelle donnée prête à être envoyée ou à recevoir. Le nœud dans ce cas bascule dans le temps entre les états actif et inactif et développe ainsi un comportement appelé cycle d'activité. Un cycle d'activité d'un nœud est défini comme étant la fraction de temps durant laquelle ce nœud est actif pendant sa durée de vie. Chaque nœud dans un voisinage d'un RCSFs effectue des tâches coopératives avec d'autres nœuds, celles-ci nécessitent une coordination efficace dans la gestion des différents cycles d'activités correspondants. Les différents basculements veille/réveil (Sleep/Wake up). Ainsi, des mécanismes de planification des modes veille/réveil doivent impérativement accompagner toute approche basée sur le concept de cycle d'activité.

2.5.2 Approches dirigées par les données

Dans ce cas, la stratégie d'économie d'énergie est fondée sur la nature des données brutes collectées par les nœuds capteurs et aussi sur la manière avec laquelle ces données sont collectées en présence d'un sous-système de capture fortement consommateur d'énergie. En effet, les données brutes collectées par les nœuds d'un RCSFs, notamment dans le cas des applications environnementales, ont souvent une forte corrélation spatiale et/ou temporelle. Ceci permet une génération de données redondantes inutiles à transmettre au puits (Sink), car leur transmission implique un gaspillage d'énergie de communication même si on admet que le coût énergétique d'une collecte est négligeable. Les techniques dirigées par les données doivent être ainsi conçues afin de réduire la quantité de données brutes prélevées par les capteurs en assurant une qualité de capture d'un niveau acceptable vis-à-vis des objectifs de l'application considérée. Notons enfin que les techniques basées sur le cycle d'activité peuvent être aussi employées dans un processus de collecte de données.

2.5.3 Approches basées sur la mobilité

Dans le cas où certains nœuds capteurs (y compris la station de base) sont mobiles, dotés de modules de mobilité pour se déplacer dans l'espace de déploiement, la mobilité peut être exploitée pour réduire considérablement la consommation énergétique, en plus des deux techniques précédentes. Lorsque ces nœuds mobiles sont excessivement chers, ils doivent exister en un nombre très limité parmi les nœuds formant le réseau ou parfois attachés à des plates formes mobiles déjà présentes dans l'espace de déploiement, comme par exemple des soldats dans des applications militaires ou des animaux dans certains scénarios d'applications environnementales. Le gain énergétique résultant de la mobilité des nœuds peut être justifié de différentes manières. En effet, dans un RCSFs fortement statique, il apparaît souvent que certains chemins de routage multi-sauts subissent une surcharge de trafic par rapport à d'autres chemins pour transmettre les données entre les nœuds capteurs sources et la station de base. Ce déséquilibre de charge affectera directement la durée de vie du réseau. De même, les nœuds les plus proches de la station de base sont généralement les plus sollicités lors d'une opération de routage pour relayer les données vers le Sink. Si on imagine que certains nœuds (y compris le Sink) sont mobiles, le flux de trafic peut être altéré en affectant à ces nœuds mobiles la responsabilité de collecte directe des données à partir des nœuds statiques. De cette manière, ces derniers attendent le passage du nœud mobile pour lui transmettre les données à proximité (directement ou à un nombre très restreint de sauts). Ils

Chapitre 2: Technique de conservation d'énergie dans les RCSF

peuvent ainsi préserver la consommation d'énergie qui sera gaspillée dans les cas suivants : utilisation des chemins plus longs, problème de contention, trop de messages de contrôle (overhead) pour le routage des données. En plus, les nœuds mobiles peuvent également parcourir uniformément le réseau afin d'assurer un équilibrage de charge énergétique en terme de communications réseau. Pour plus de détails sur l'effet de la mobilité sur la préservation d'énergie dans un RCSFs, nous invitons le lecteur à consulter les références.

2.7 Conclusion

Dans les réseaux RCSF. Chaque Nœud est alimenté par une source d'énergie limitée (batteries) et généralement irremplaçable.les capteur sont déployé dans des zones inaccessibles ou encore déployés sur des grand espace. C'est à-dire lorsqu'il est difficile voire infaisable de remplacer les batteries des nœuds quand elles arrivent à épuisement. L'énergie est consommée en assurant les fonctions suivantes: la capture, le calcul (traitement) et la communication.

La durée de vie réseaux de capteurs sans fil doit tenir compte de la connectivité et de la couverture si elles nécessaire ou besoins d'applications.

À la fin de ce chapitre nous avons traité le problème énergétique en donnant des techniques de conservation d'énergie

Dans le prochain chapitre, nous examinerons les protocoles de conservation d'énergie

Chapitre 3: Protocoles de routages dans les RCSF

Sommaire

3.1 Introduction

2.3 Protocole

2.3 Définition du routage

2.4 Classification des protocoles de routages

2.5 Tableau comparatif pour les protocoles de routage étudié

2.6 Conclusion

3.1 Introduction :

Un réseau de capteurs sans fil consiste en un ensemble de nœuds capteurs déployés à grande échelle dans un champs de captage pour détecter, recueillir et transmettre les données, concernant un phénomène observé, vers le nœud puits via les liens sans fil. Cependant, suivant le nombre de nœuds du réseau et l'étendu du champ de captage, certains nœuds ne pourront pas transmettre directement leurs messages au nœud collecteur. Ainsi, la collaboration entre les nœuds pour garantir cette transmission est une exigence. De cette manière, les messages sont propagés par les nœuds intermédiaires en établissant les chemins multi-sauts entre la source lointaine et le puits. Ce processus d'acheminement des messages d'un nœud source du réseau vers un nœud destinataire s'appelle le routage.

Dans les RCSFs, les protocoles visent à conserver le maximum d'énergie. Plusieurs travaux de recherche récents sont entrepris dans le contexte d'économie d'énergie en RCSF. Pour cela, des études ont été effectués dans la communication des nœuds qui regroupe les algorithmes de routage et les protocoles de contrôle de la topologie.

3.2 Le protocole :

Un protocole réseau est un protocole de communication mis en œuvre sur un réseau informatique ou un réseau de télécommunications.

Nommait protocole ce qui est utilisé pour communiquer sur une même couche d'abstraction entre deux machines différentes. Par extension de langage, on utilise parfois ce mot aussi aujourd'hui pour désigner les règles de communication entre deux couches sur une même machine. [44]

3.3 Définition du routage :

Le routage est une méthode d'acheminement des données à la bonne destination à travers un réseau de connexion donnée. Le problème de routage au sein des RCSFs est assez complexe et cela est dû essentiellement à l'absence d'infrastructure fixe (forêt, mer, E). [45]

En résumé pour un bon routage il faut:

- Faible latence.
- Utilisation des meilleures liaisons de données.
- Minimisation de la charge du réseau, afin d'éviter le problème des collisions.
- Tolérance aux pannes et fiabilité.

Exemple :

Si on suppose que les coûts des liens sont identiques, le chemin indiqué dans la figure suivante est le chemin optimal reliant la station source et la station destination. Une bonne stratégie de routage utilise ce chemin dans le transfert des données entre les deux stations.

-Pour comprendre c'est quoi le routage, c'est simple, on suppose qu'on a 7 nœuds qui sont reliées par des arcs qui représentent les routes possibles comme nous le montre la figure ci-dessous :

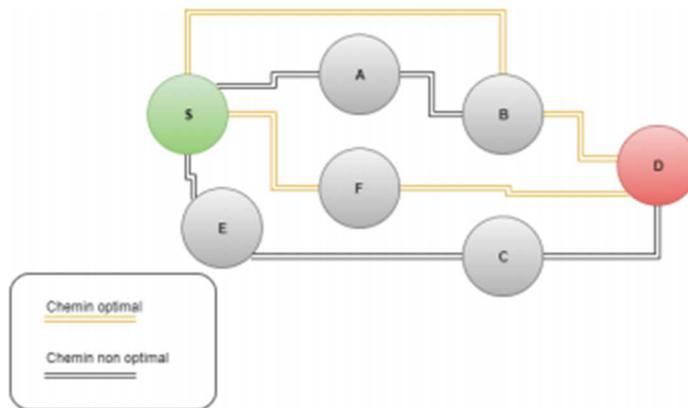


Figure 3. 1: Graphe représentatif du routage, dans un réseau de 7 nœuds.

Notre objectif est d'atteindre le point D en partant du Point S en optimisant la distance (le plus court chemin) an que la communication soit optimale entre S et D, on suppose que tous les arcs qui relient deux entêtées sont égaux. La route optimale entre S et D serait donc celle qui cumule le moins d'arcs en ayant comme départ le point S pour arriver au point D.

3.4. Classification des protocoles de routages

Les protocoles de routage ont été classés dans [46], [47] selon plusieurs critères (**Figure**)

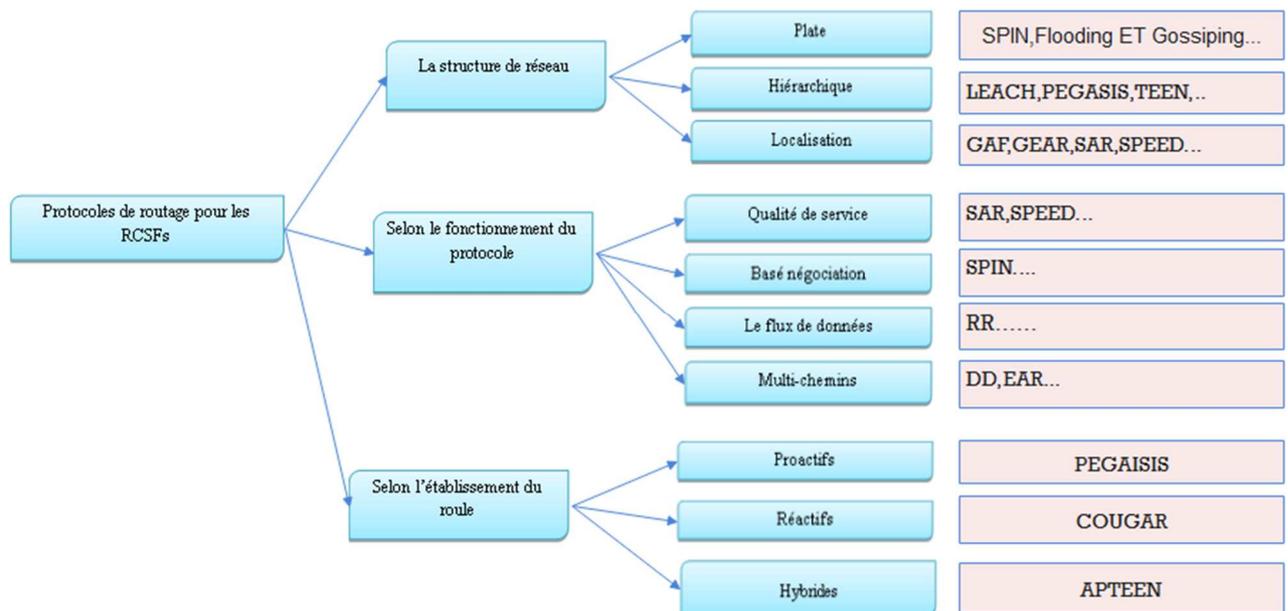


Figure 3. 2: Diagramme de classification des protocoles de routages.

3.4.1 Selon la structure du réseau

Elle détermine l'organisation des capteurs dans le réseau, et il existe deux catégories de topologies :

3.4.1.1. Topologie plate

Un réseau de capteurs sans fil plat est un réseau homogène où tous les nœuds sont identiques en termes de batterie et de complexité du matériel et ont le même rôle, excepté la station de base qui joue le rôle d'une passerelle et qui est responsable de la transmission de l'information collectée à l'utilisateur final. Selon le service et le type de capteur, une densité de capteurs élevée (plusieurs nœuds capteurs/m²) ainsi qu'une communication multi-sauts peuvent être nécessaire pour une architecture plate. [48] Nous trouvons par exemple dans cette topologie

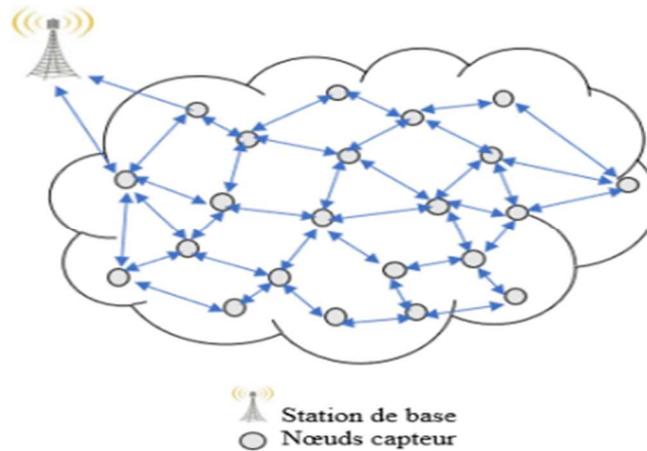


Figure 3. 3: Topologie plate

Exemple : Flooding et Gossiping

La technique d'inondation (flooding) est une technique classique [08] qui peut être utilisée pour le routage dans les réseaux de capteurs. Dans cette approche, chaque nœud recevant une donnée ou un paquet de contrôle le diffuse à tous les nœuds voisins jusqu'à ce que le nombre maximum de sauts pour ce paquet soit atteint ou le paquet arrive à sa destination qui est la station de base il y aura par conséquent une inondation totale du réseau.

Flooding est un protocole réactif qui n'exige pas une maintenance onéreuse pour la topologie du réseau ni des algorithmes complexes pour la découverte des routes, mais il présente aussi des inconvénients :

L'implosion : qui s'explique par la provenance de messages dupliqués vers un même nœud.

Le chevauchement : si deux nœuds observent le phénomène dans la même région, la même information sera envoyée deux fois (redondance de données).

Ignorance de ressources : utilise aveuglement les ressources disponibles sans tenir compte de leurs quantités.

Afin d'y remédier au problème de l'implosion, le protocole Gossiping [08] est apparu qui est une légère amélioration de Flooding où un nœud recevant un message ne le diffuse pas à tous ses voisins, mais il le transmet à un seul sélectionné aléatoirement, jusqu'à ce que les données atteignent la station de base. Le problème avec cette approche est qu'elle prend beaucoup de temps à propager le message dans tout le réseau.

Avantages

- Scalabilité : les réseaux à plat sont scalables du fait que chaque nœud participe également à la tâche de routage et puisque les nœuds ont besoin seulement des informations sur leurs voisins directs.
- Simplicité : les réseaux à plat permettent aux protocoles de routage d'être simples, puisqu'il est possible d'établir le réseau sans overhead ainsi que nous n'avons aucun besoin d'algorithmes complexes pour faire le choix d'un cluster-head.

Inconvénients

- Points chauds (Hotspots) : si les nœuds capteurs sont uniformément distribués dans tout le réseau et il y a un seul nœud puits. Alors, les nœuds au tour de ce dernier épuiseront leurs énergies plus tôt que les autres nœuds. Parce que tout le trafic du réseau passe par les nœuds entourant le nœud puits.

3.4.1.2 Topologie hiérarchique :

Afin d'augmenter la scalabilité du système, les topologies hiérarchiques ont été introduites en divisant les nœuds en plusieurs niveaux de responsabilité. L'une des méthodes les plus employées est le Clustering, avec laquelle le réseau est partitionné en groupes appelés clusters. Un cluster est constitué d'un chef (cluster Head) et de ses membres. Suivant l'application, les membres peuvent être des voisins directs ou indirects du cluster Head. Avec une approche hiérarchique, il est plus facile d'intégrer un mécanisme d'agrégation au système, les nœuds membres transmettent leurs données vers le cluster Head, qui va par la suite agréger ces lectures afin de transmettre le résumé à la station de base [48], l'inconvénient de la hiérarchisation est la surcharge des clusters Head, induisant à un déséquilibre de la consommation d'énergie sur le réseau, pour y remédier il faut considérer les clusters Head comme des capteurs spécifiques avec plus de ressources énergétiques et plus de capacité de traitement, ou bien ils peuvent être élus dynamiquement et ainsi garantir un équilibre de consommation d'énergie. Un tas de protocoles a été présenté pour la topologie hiérarchique, nous trouvons par exemple LEACH [49] qui est le premier protocole proposé dans la littérature, nous avons aussi plusieurs améliorations de LEACH, tel que LEACH-C [], PEGASIS [50] et plein d'autres que nous développerons dans le chapitre suivant.

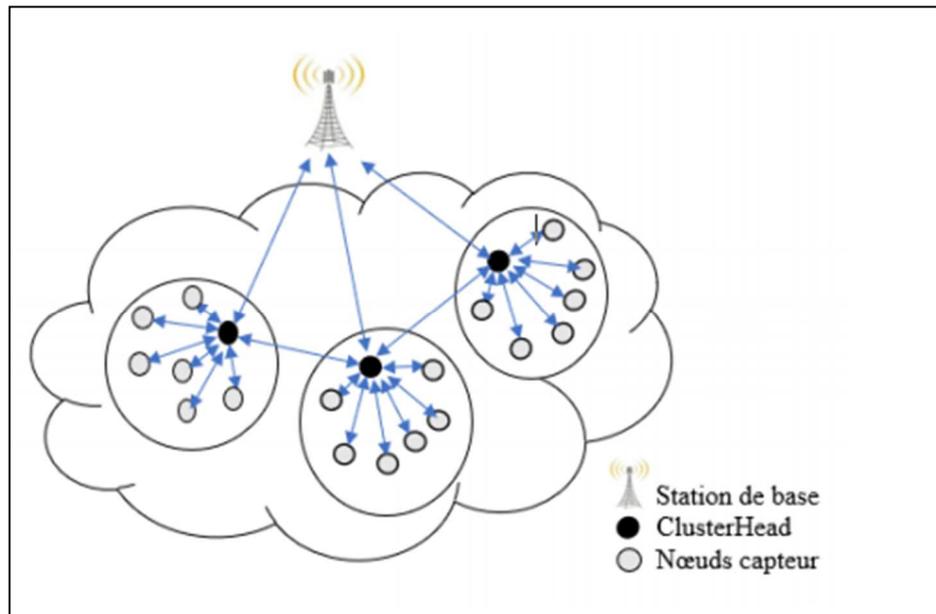


Figure 3. 4: Topologie hiérarchique.

Exemple: LEACH-C (low-energy Adaptive Clustering Hierarchy-centralized)

Nous avons retenu les travaux de Heinzelman et al. [51] [34] qui présentent aujourd'hui d'excellents résultats en terme d'économie d'énergie. Ces derniers ont proposé le protocole LEACH et une version centralisée de ce protocole, appelé LEACH-C. Tous deux s'appuient sur le clustering, qui consiste, de façon similaire aux réseaux téléphoniques cellulaires, à partitionner le réseau en groupes (clusters). Les noeuds transmettent leurs données vers des représentants de groupes dits clusterheads (CHs), qui à leur tour envoient ces données vers la destination désirée ou la station de base. Dans certaines applications les clusterheads font des traitements simples (agrégations par exemple) sur les données reçues avant de les retransmettre à la station de base. Cette approche permet la réutilisation de la bande passante. Elle offre aussi une meilleure allocation de ressources et aide à améliorer le contrôle de l'énergie dans le réseau. [52].

(LEACH-C) permet de déterminer, à partir de la position exacte des noeuds, la configuration optimale pour minimiser l'énergie dépensée. LEACH-C (LEACH-CENTRALISE) est une variante de LEACH où les grappes sont formées d'une manière centralisée par la station de base. LEACH-C utilise la même étape de transmission que LEACH. Durant la phase d'initialisation la BS reçoit de chaque noeud des informations concernant leur localisation, et leur réserve d'énergie. Ensuite, elle exécute un algorithme de formation de grappes centralisé afin de former les grappes et sélectionner leurs CHs. LEACHC utilise l'algorithme de la réussite simulée [21] pour obtenir des grappes optimales. Dès que les grappes sont formées, la station de base envoie ces informations à tous les noeuds

du réseau. Cependant, la version centralisée de LEACH n'est pas adaptée aux réseaux de grande dimension.

Avantages

- L'agrégation de données : l'avantage du routage hiérarchique est que les données du cluster entier peuvent être combinées par le cluster-head et envoyées vers la destination.

Inconvénients

- Points chauds (Hotspots) : les nœuds élus comme des cluster-Head consomment plus d'énergie que les autres nœuds dans le réseau. Si les cluster-Head ne changent pas régulièrement, le réseau va être partitionné, c'est à dire le découpage du réseau en secteurs.
- Condition physique : plusieurs protocoles exigent que les nœuds cluster-Head ont des ressources énergétiques plus élevées que les autres nœuds dans le réseau.
- Complexité : si les nœuds cluster-Head ont la même capacité que les autres nœuds dans le réseau, donc, la méthode utilisée pour faire le routage et le choix des clusterheads 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-Head augmente quand la taille du réseau augmente. Et par conséquence, le nombre des messages overhead augmente lors de l'établissement de ces clusterheads.

3.4.1.3. Basé localisation (location-based) :

Ce paradigme et la décision de routage se base sur la position géographique du nœud capteur, ce type de mécanisme nécessite un déploiement d'une solution de positionnement dont le degré de positionnement dépend de l'application, l'utilisation de GPS reste trop couteuse pour les RCSF néanmoins il existe d'autre méthodes de localisation [53].

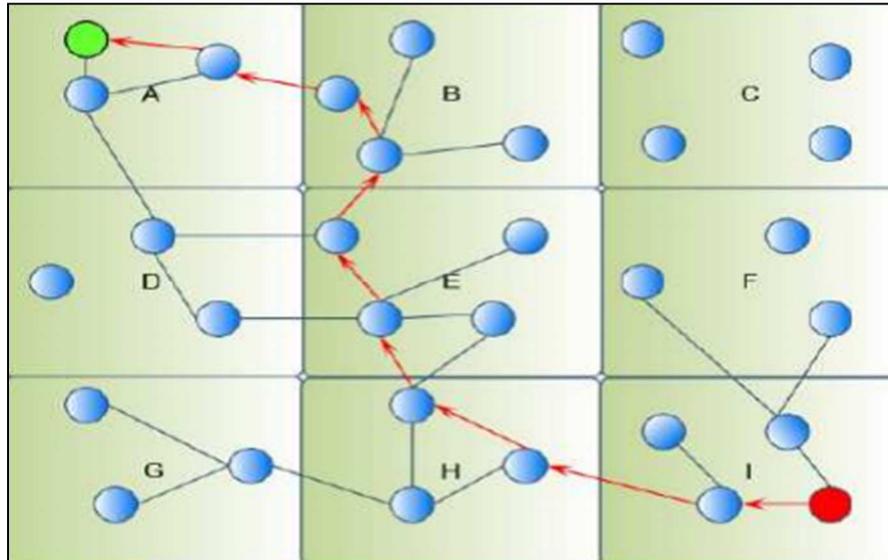


Figure 3. 5: topologie basé sur la localisation

Exemple : GAF (Géographic Adaptive Fidelity)

Le protocole [54] est basé sur la localisation, conçu au début pour les réseaux Ad Hoc, et efficace en consommation d'énergie, néanmoins il peut être appliqué aux réseaux de capteurs. Le principe de GAF est de former une grille virtuelle à travers le champ de captage, où chaque nœud est affecté à une zone selon les coordonnées géographiques par GPS dont l'objectif est la déconnection des nœuds inutiles du réseau sans affecter le niveau de fidélité de l'opération de routage, le niveau de fidélité concerne la connectivité persistante des nœuds capteur communicant entre eux. De ce fait les nœuds se trouvant dans la même zone de la grille sont considérés équivalents en termes de coût lié au routage des paquets, cette équivalence est assurée en utilisant un seul nœud à la fois et de mettre en veille les autres nœuds associés au même point de la grille afin d'optimiser la quantité d'énergie consommée. Ainsi GAF peut augmenter considérablement la durée de vie du réseau avec la croissance du nombre de nœud. La figure ci-dessous illustre l'exemple de la grille dans GAF, où le nœud 1 peut atteindre les nœuds 2,3 et 4, Ces derniers peuvent atteindre le nœud 5, donc les nœuds 2,3 et 4 sont équivalents alors deux d'entre eux peuvent être mis en veille.

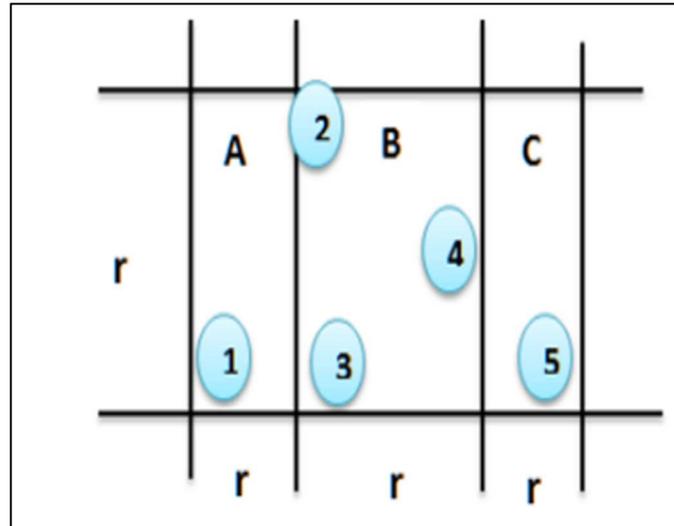


Figure 3. 6: illustration du protocole GAF.

Avantages

- Avec les informations de positionnement, le réseau minimise de l'énergie grâce à la facilité de calcul des routes énergétiquement optimales.

Inconvénients :

- La nécessité d'équiper les nœuds capteurs avec un système de localisation par satellite comme le GPS qui consomment énormément d'énergie.

3.4.2 Selon le mode de fonctionnement du protocole

Ce mode de fonctionnement définit la manière avec laquelle les données sont propagées dans le réseau, le protocole est classé en quatre catégories :

3.4.2.1. Routage basé sur la qualité de service (QOS) (based routing)

Ce protocole de routage doit équilibrer le réseau entre la consommation d'énergie et la qualité de données, en particulier satisfaire le retard, l'énergie, la largeur de la bande passante, ce genre de protocole est recommandé pour les applications de surveillance [52]. Nous trouvons par exemple dans cette topologie.

Exemple : SAR (Sequential Assignment routing)

Le protocole SAR [08] est considéré comme le premier protocole qui a introduit la notion de qualité de service durant la décision de routage. Au cours de l'opération de sélection d'un itinéraire, SAR prend en considération trois facteurs importants : La qualité de service et la consommation d'énergie pour chaque route candidate ainsi que le niveau de priorité pour chaque paquet transmis (la priorité peut être établie selon la fraîcheur des données et leur importance). En créant des arbres, des routes multiples sont formées entre les capteurs et la

station de base pilotée par une table de routage. Une de ces routes est choisie selon les critères ressources énergétiques et la QoS, en cas de rupture de route, le rétablissement est possible en proposant automatiquement une restauration à partir de la table de routage entre les nœuds ascendants et descendants.

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

3.4.2.2 Routage basé sur la négociation

Quand le réseau est inondé par des paquets de même données, on utilise le protocole de négociation qui met fin à la redondance de données, en effet avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux les données en échangeant les paquets de signalisation spéciales, appelés métadonnées, ces paquets permettent de vérifier si le paquet est déjà transmis ou pas, et ainsi garantir que seules les informations utiles seront transmises [52].

Exemple: SPIN (Sensors Protocols for Information via Negotiation)

SPIN est l'un des premiers protocoles de routage basé sur une négociation. Le fonctionnement du protocole SPIN [34] est résumé dans la figure (3.7). Il procède à un nommage de l'information et fonctionne par un système de publication/souscription. À la réception d'une nouvelle donnée, la station informe toutes ses voisines (celles qui sont à sa portée) de la disponibilité de l'information par des paquets ADV (Advertising), et les stations intéressées peuvent ensuite envoyer une requête pour obtenir l'information par des paquets REQ (REQuête). L'avantage principal de SPIN est l'élimination des envois redondants des données en utilisant la négociation. En plus, les changements de la topologie n'affectent pas les performances du protocole réseau car chaque nœud ne se base que sur les informations locales pour la prise de décision; il n'a besoin de communiquer des informations de contrôle qu'avec ses voisins directs. Néanmoins, cet avantage peut générer un inconvénient majeur qui est le non garanti de la livraison des données dans le cas où le nœud ayant des données sollicitées est injoignable.

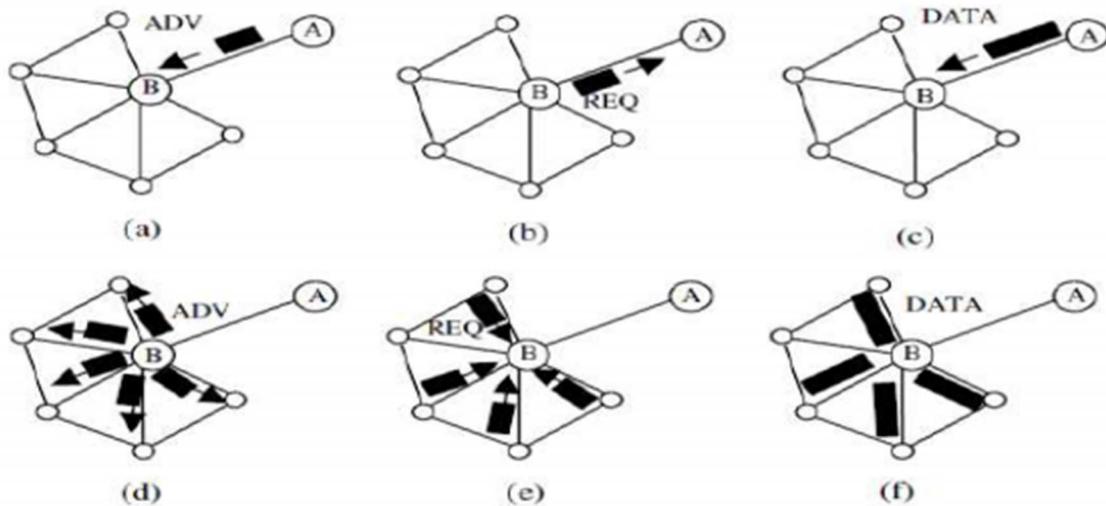


Figure 3. 7: Fonctionnement de protocole SPIN

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 au nœud puits.

3.4.2.3. Routage basé sur le flux de données

Dans cette approche, la phase d'établissement de routes est modélisée et résolue comme un problème de demande de flux de données où le flot représente les routes que les paquets empruntent et la demande représente le taux auquel les paquets sont produits par les différents nœuds [46].

Exemple : RR (Rumour Routing)

RR [55] est une variante du protocole DD qui essaie de trouver un compromis entre l'inondation des intérêts et la propagation des données. En effet, dans DD, les nœuds inondent généralement le réseau par la diffusion des intérêts, alors que dans le cas de certaines applications des RCSF, seule une petite quantité de données est demandée par la station de

base. Le protocole RR permet d'éviter ce problème d'inondation en routant les données uniquement aux nœuds qui ont capturé un événement particulier. Pour ce faire, il utilise le concept d'agent qui est un paquet avec un grand TTL (Time To Live) traversant le réseau pour informer l'ensemble des nœuds des événements qu'il a rencontrés tout au long de son parcours sur le réseau. Ainsi, chaque nœud maintient une table de relais locale contenant le prochain sauts vers la station de base et une métrique qui représente le nombre de saut vers chaque nœud relais. Lorsqu'un nœud détecte un nouvel évènement, il l'ajoute ainsi dans sa table locale et crée ensuite un nouvel agent en se basant sur une certaine probabilité.

3.4.2.4. Routage basé sur les multi-chemins

Au lieu d'utiliser un simple chemin, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples et cela pour rendre le réseau encore plus performant, la fiabilité d'un protocole de routage peut être prouvé par sa performance à repérer des chemins alternatifs en cas de défaillance du chemin primaire, ce genre de protocole exige plus de ressources énergétiques et plus de messages de contrôle [52].

Exemple : RR (Directed Diffusion)

Directed Diffusion [60] est un protocole de routage de catégorie data-centric, permettant d'utiliser plusieurs chemins pour le routage d'information. Le principe de fonctionnement du protocole DD est le suivant : Le nœud « Sink » commence à envoyer, vers tous les noeuds, un message Interest pour démarrer une application bien déterminée. Ce paquet sera acquitté par un autre appelé gradient. Un gradient est un lien de réponse de la part du voisin recevant l'intérêt. En utilisant les intérêts et les gradients, p*plusieurs chemins peuvent être établis entre le « Sink » et la source. L'un de ces chemins est sélectionné par renforcement. Si ce chemin échoue un nouveau ou un alternatif doit être identifié La figure 2.2 suivante illustre les phases de fonctionnement de ce protocole [23].

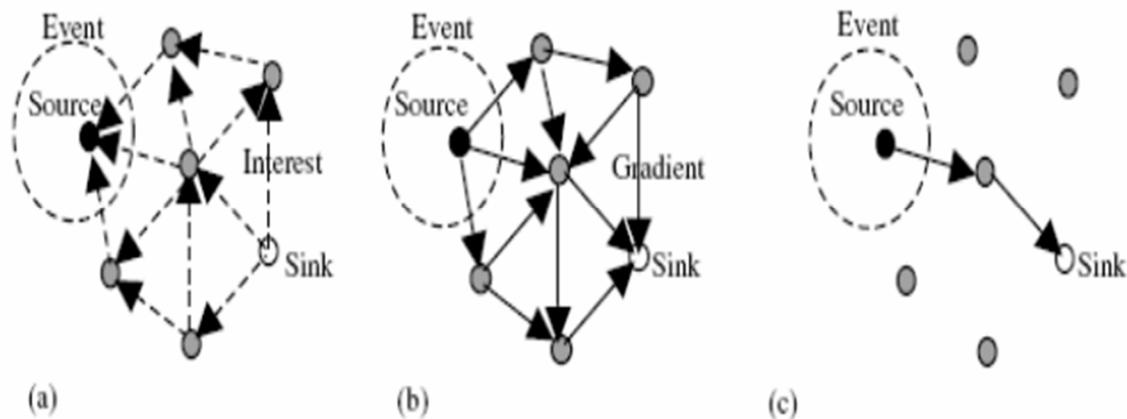


Figure 3. 8: phases du protocole de diffusion dirigée. (a) propagation de l'intérêt. (b)

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.

3.4.3 Selon le mode d'établissement des chemins

3.4.3.1. Les protocoles proactifs

Utilise l'échange de messages de contrôle pour assurer au niveau de chaque nœud une table de routage qui associe à chaque destination un voisin directe par lequel les paquets doivent être directement reliés, ce protocole permet de disposer d'une route immédiatement vers chaque destination au moment où un paquet doit être envoyé. Ce genre de protocole est généralement utilisé pour les prélèvements périodiques des données par conséquent le protocole peut se mettre en veille durant la période d'inactivité [52] parmi les protocoles appartenant à cette catégorie nous trouvons LEACH [34], LEACH-C [57], PEGASIS [54].

Exemple: PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

PEGASIS est une amélioration du protocole LEACH. Au lieu de former plusieurs clusters, PEGASIS forme des chaînes de nœuds de sorte que chaque nœuds transmet et reçoit des nœuds voisins appartenant à la chaîne. Un seul nœud est choisi, parmi cette chaîne, pour transmettre au cluster. Ce nœud est nommé (leader node). Les données recueillies se déplacent d'un nœud à un autre, et seront agrégées puis envoyées au cluster par le nœud leader. Dans le PEGASIS hiérarchique les nœuds construisent une chaîne qui forme un arbre hiérarchique. Chaque nœud leader, choisi dans un niveau particulier, transmet des données aux nœuds du niveau supérieur de la hiérarchie jusqu'à atteindre la station de base cluster [58].

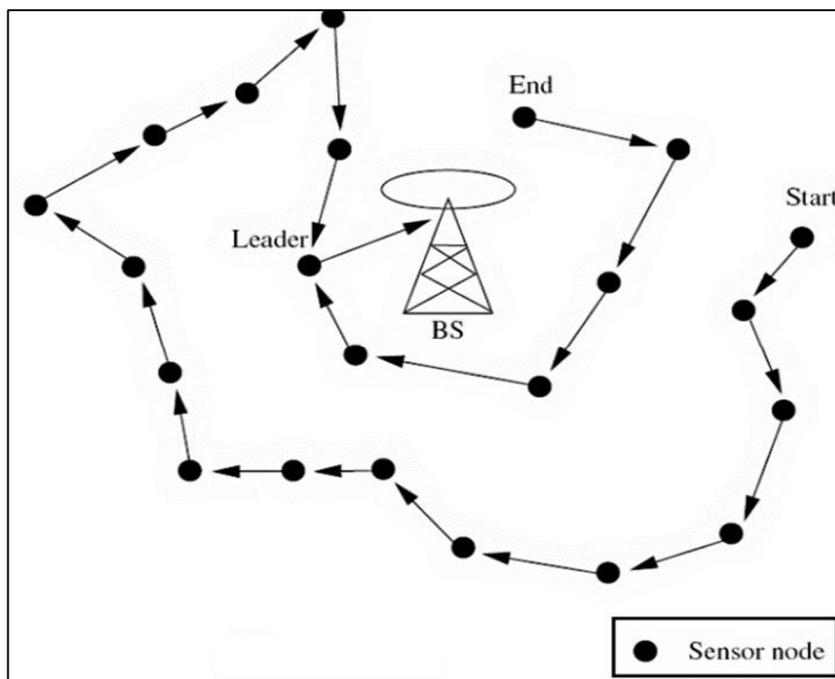


Figure 3. 9 : Illustration de protocole PEGASIS

Avantages

- Les routes sont établies à priori, ce qui facilite l'acheminement des données.

Inconvénients

- Les routes sont sauvegardées mêmes si elles ne sont pas utilisées.
- Les nœuds du réseau maintiennent des tables de routage pour toutes les destinations indépendamment de l'utilité des routes.
- La mise à jour de ces tables est assurée par la diffusion périodique des paquets de contrôle dans le réseau, ce qui induit un contrôle excessif surtout dans le cas des réseaux à grande taille.

3.4.3.2. Les protocoles réactifs

Intitulé aussi protocole de routage à la demande, ce dernier est créé et maintient les routes lorsqu'un nœud en a besoin, alors une procédure de découverte globale est lancée et elle s'achève lorsque une route est découverte ou lorsque les permutations de routes ont toutes été examinées, la route trouvée est gérée par une procédure de maintenance de routes jusqu'à ce que le nœud source n'aura plus besoin de cette route [59].

Exemple : Cougar

Dans le protocole Cougar [60], le réseau est vu comme une base de données distribuée et les données capturées par les nœuds sont modélisées comme une table relationnelle. Dans cette table, chacun des attributs représente soit des informations sur le nœud capteur ou bien des données produites par ce nœud. Afin de manipuler les tables de la base de données distribuée au niveau de la station de base, Cougar fournit une interface de gestion et de manipulation des données similaire à l'interface de SQL. Cette interface permet à la station de base d'interroger le réseau sur une information particulière. Notons que Cougar fournit également aux nœuds capteurs un mécanisme pour une agrégation partielle des données.

Avantages

- La conservation d'énergie par rapport aux protocoles proactifs.

Inconvénients

- Le routage à la demande induit une lenteur à cause de la recherche des chemins, ce qui peut dégrader les performances des applications interactives.
- Il est impossible de connaître au préalable la qualité du chemin (en terme de bande passante, délais, etc).

3.4.2.3 Les protocoles hybrides

Ce type de protocole utilise les protocoles réactifs et proactifs à la fois, les proactifs pour apprendre quel est le voisin le plus proche, ainsi il dispose immédiatement des routes dans le voisinage, au-delà du voisinage il fait appel au protocole réactif pour chercher des routes [61].

Exemple : APTEEN (Adaptive TEEN)

APTEEN est un protocole hybride qui étend le protocole TEEN en permettant de palier aux limitations de ce dernier. Il est proposé par Manjeshwar et al. [62]. APTEEN permet de changer la périodicité et les valeurs seuils utilisées dans TEEN selon les besoins de l'utilisateur et le type d'application. Dans ce protocole, les CH transmettent à leurs membres l'ensemble de paramètres physiques que l'utilisateur a besoin afin d'obtenir des informations

Chapitre 3: Protocoles de routages dans les RCSF

sur le RCSF. Les seuils HT, ST, les “schedule” TDMA, ainsi qu’un compteur de temps (qui mesure la période entre deux transmissions successives d’un nœud capteur donné) sont également transmis par chaque CH à l’ensemble de ses nœuds membres. APTEEN offre une grande flexibilité qui permet à l’utilisateur de choisir les valeurs seuils HT, ST et l’intervalle pour les compteurs de temps afin que la consommation énergétique des nœuds soit contrôlée par la variation de ces paramètres.

Cependant, APTEEN nécessite une complexité supplémentaire pour l’implémentation des fonctions seuils et des compteurs de temps.

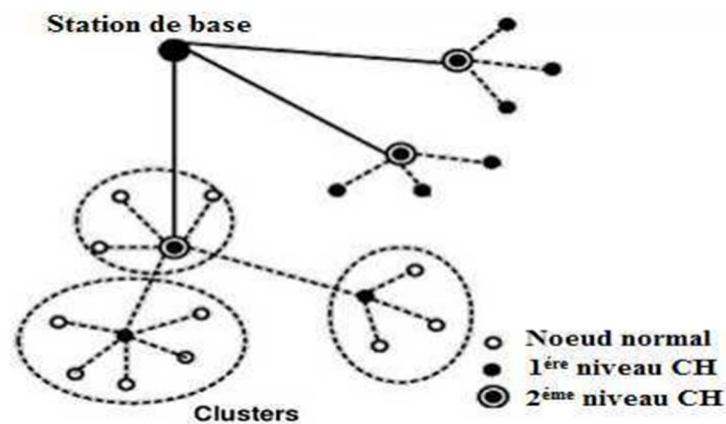


Figure 3. 10: Clustering hiérarchique dans TEEN et APTEEN

3.4 Tableau comparatif pour les protocoles de routage étudiés

Dans le tableau 1, nous faisons une synthèse des différents protocoles de routage présentés ci-dessous en comparant leur famille d’appartenance (plat ou hiérarchique), leur Chemin de transmission, leur Efficacité énergétique, leur Métrique, Temps réel, Qos, Basée sur requête et leur Over Head

Tableau 3. 1: Comparaison des protocoles de routage de RCSF

	Structure de réseau	Etablissement de la route	Bas Qos	Basé négociation	Bas requête	Multi-chemins
Flooding et Gossiping	Plat	Réactifs	Non	Non	Non	Non
LEACH-C	Hiérarchique	Proactifs	Non	Non	Non	Non
GAF	Localisations	Proactifs	Non	Non	Non	Non
SAR	Plat	Proactifs	Oui	Oui	Non	Oui
SPIN	Plat	Réactifs	Non	Oui	Oui	Oui

Chapitre 3: Protocoles de routages dans les RCSF

RR	Plat		Non	Non	Oui	Non
DD	Plat	Hybrides	Non	Oui	Oui	Oui
PEGASS	Hiérarchique	Proactifs	Non	Non	Non	Non
COUGAR	Plat	Réactifs	Non	Non	Non	Non
APTEEN	Hiérarchique	Hybrides	Non	Non	Non	Non

3.5 Conclusion

Les protocoles de routage proposés pour les RCSFs sont donc nombreux, mais ils ont tous un objectif commun : Assurer l'acheminement des données collectées par les nœuds capteurs tout en essayant d'étendre la durée du réseau. Cela nécessite la prise en compte des caractéristiques des RCSFs et des exigences des applications pour lesquelles ces réseaux sont destinés.

Dans ce chapitre, nous avons identifié et classifié quelques protocoles de routage pour les RCSFs. le chapitre suivant nous allons mettre une notre solution pour minimiser la consommation d'énergie

Chapitre 4: Approche d'optimisation d'énergie dans le RCSF.

4.1 Introduction

4.1 Introduction

4.2. Outils de développement

4.3 Solution proposée

4.3.1 Modèle du réseau

4.4 Simulation

4.5.Conclusion

4.1 Introduction

Le problème souvent posé dans un réseau de capteurs est l'énergie. En effet, les capteurs sont dotés de ressources énergétiques très limitées et généralement irremplaçables, un nœud doit donc utiliser son énergie de manière optimale pour améliorer sa durée de vie.

Dans ce chapitre, nous présenterons notre modèle du réseau dans lequel notre solution proposée est opérationnelle. Ensuite, nous détaillons notre contribution. Enfin nous présenterons et analyserons les résultats de simulation obtenus.

4.2. Outils de développement

MATLAB (MATrix LABoratory) est un langage de script émulé par un environnement de développement du même nom ; il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The Math Works, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, et de créer des interfaces utilisateurs [63].

Pour valider notre solution, nous avons effectué une série de simulation avec MATLAB 7.9.0(R2009b). Nous choisissons l'environnement de langage de programmation MATLAB pour simuler et valider notre contribution pour plusieurs raisons. Parmi lesquelles nous citons les suivantes:

- MATLAB offre un certain nombre de fonctionnalités pour la documentation et le partage du travail.
- MATLAB est un langage de haut niveau pour le calcul scientifique et technique.
- MATLAB possède des fonctions graphiques 2D et 3D pour visualiser les données graphiques destinées à la visualisation de données et outils conçus pour créer des tracés personnalisés.
- MATLAB contient des applications dédiées à l'ajustement de courbes, la classification de données, l'analyse de signaux et bien d'autres tâches spécialisées.
- MATLAB possède des boîtes à outils additionnelles conçues pour répondre à de nombreux besoins spécifiques aux ingénieurs et aux scientifiques.
- Programmation infiniment plus rapide pour le calcul et pour l'affichage.

Le tableau 4.1 suivant résume les différentes caractéristiques de l'ordinateur utilisé dans la simulation de notre solution proposée.

Tableau 4. 1 : Caractéristiques de l'ordinateur utilisé.

Matériel	Caractéristiques
Processeur	Intel(R) Core(TM) i5-2540M CPU @ 2.60GHz.
Mémoire (RAM)	4.00 Go.
Système d'exploitations	Microsoft Windows 7 professionnel 64-bit .

4.3 Solution proposée

Notre but est la minimisation de consommation de l'énergie des nœuds capteurs pour prolonger la durée de vie et donc la durée de vie de réseau entier. Pour cela, nous avons conçu une solution qui se base sur une architecture hiérarchique en combinant les deux structures hiérarchiques: structure hiérarchique en clusters et structure hiérarchique en chaîne afin d'orienter les données collectées de nœuds sources vers la station de collecte (puits). Dans un premier temps, nous présentons les deux modèles utilisés: le modèle de réseau et modèle d'énergie. Nous présentons aussi les hypothèses sous les quelles notre contribution est fonctionnelle. Puis, nous détaillons notre solution proposée.

4.3.1 Modèle du réseau

Dans notre solution proposée, nous considérons un réseau de capteurs basé sur les structures en cluster et en chaîne constitué de N nœuds homogènes déployés aléatoirement dans un zone de 2-dimensions avec une station de base fixe.

Pour déployer les nœuds, nous avons pris en considération les critères suivants:

Lors du déploiement des nœuds, nous avons pris en compte les critères suivants :

- Le réseau considéré est composé d'un certain nombre de nœuds capteurs déployés aléatoirement.
- Les nœuds capteurs sont organisés sous forme de cluster et chaque cluster a un chef nommé Cluster Head (CH).
- Les CHs sont reliés entre eux par une chaîne.
- La chaîne intra-cluster a un chef nommé leader
- Le leader est le responsable d'envoyer les données collectées à la station de base.
- L'agrégation de données est utilisée pour réduire la taille des données envoyées.

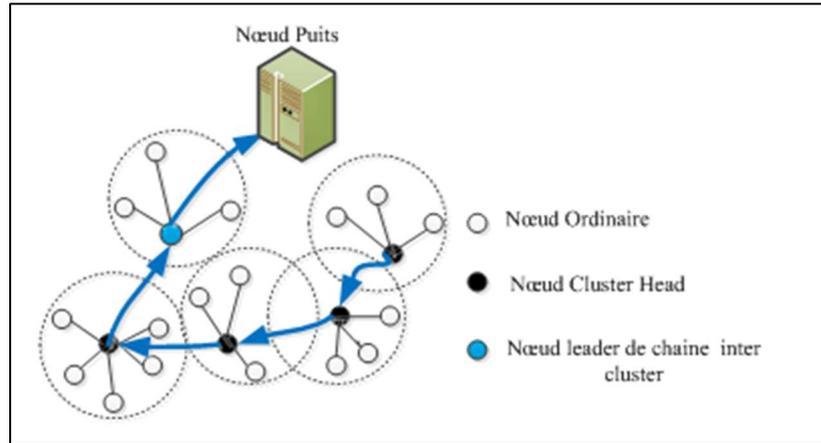


Figure 4. 1: Modèle du réseau de notre solution proposée.

4.3.2 Modèle d'énergie

Nous utilisons dans notre simulation le modèle d'énergie introduit par A. Heinzelman et al. [57] pour calculer la quantité d'énergie consommée dans les opérations de transmission et réception de données.

Afin transmettre un paquet de données de L bits sur une distance de d , l'émetteur consomme une quantité d'énergie $E_{TX}(L, d)$:

$$E_{TX}(L, d) = \begin{cases} L * E_{elec}(L, d) + L * \epsilon_{fs} * d^2, & d < d_0 \\ L * E_{elec}(L, d) + L * \epsilon_{mp} * d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Afin de recevoir un paquet de données de L bits, le récepteur consomme une quantité d'énergie $E_{RX}(L)$:

$$E_{RX}(L) = L * E_{elec} \quad (4.3)$$

Où

$E_{elec}(L, d)$ est l'énergie suffisante pour recevoir ou transmettre un bit.

L représente la taille d'un paquet de données.

ϵ_{fs} et ϵ_{mp} représentent les énergies pour l'amplification des signaux émis pour transmettre un bit dans un modèle à espace libre et dans un modèle à propagation par trajets multiples respectivement.

d représente la distance entre le nœud émetteur et le nœud récepteur.

d_0 représente la distance seuil. La distance d_0 est donnée par:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (4.4)$$

La figure 4.2 illustre le modèle d'énergie utilisé pour simuler notre solution proposée.

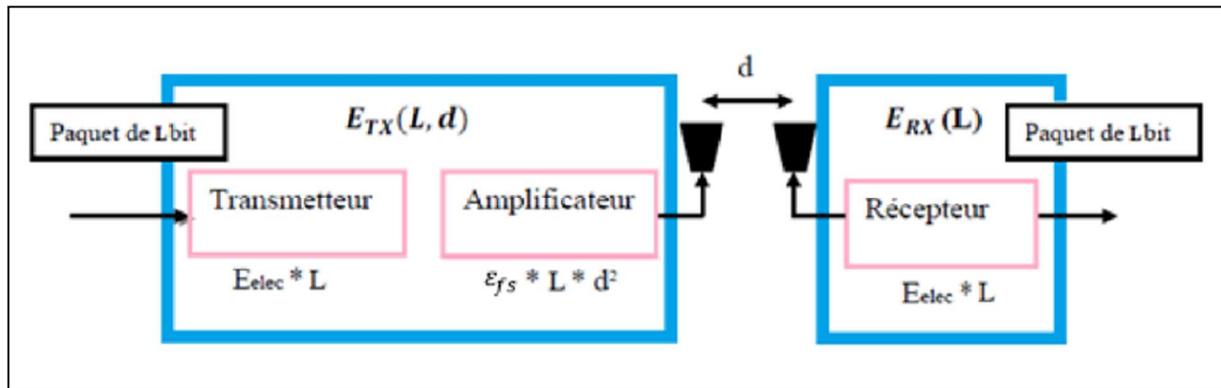


Figure 4. 2 : Le modèle de l'énergie utilisé.

4.3.3 Hypothèses

Pour simuler notre solution, nous supposons les hypothèses suivantes:

- Les nœuds capteurs sont homogènes, c'est à dire, ils ont initialement les mêmes capacités énergétique, de stockage et de calcul.
- A chaque itération les nœuds ont toujours des données collectées à envoyer au nœud puits.
- La localisation des nœuds doit être connue soit par un mécanisme de détection de position automatique.
- L'énergie initiale est uniforme pour tous les nœuds.
- Les deux rayons: de communication et de couverture sont supposés fixes et semblables pour tous les nœuds du réseau.
- Chaque nœud peut jouer différents rôles: nœud ordinaire, nœud de relais, nœud CH et nœud leader.
- Le nœud puits SB est supposé n'est pas limité en termes de puissance de calcul, de mémoire et d'énergie.
- Les liens sont symétriques de telle sorte que l'énergie nécessaire pour transmettre un paquet de données du nœud A au nœud B est la même que pour transmettre un paquet de données partir du nœud B vers le nœud A .

4.3.4 Détail de la solution proposée

Notre solution est une solution centralisée où le nœud récepteur est responsable de l'exécution de notre programme. Initialement:

- Chaque nœud a un identifiants unique.
- Chaque nœud capteur envoie au nœud puits les informations suivantes : son identifiant, sa position et son énergie initiale.

Notre solution (protocole) s'exécute en plusieurs itérations, chaque itération est divisée en trois phases: phase de construction des clusters, phase de construction des chaînes, et phase de transmission des données.

4.3.4.1 Phase de construction des clusters

Notre solution divise le réseau en plusieurs clusters. Puisque notre protocole est centralisé, le nœud puits choisit au hasard 20 % des nœuds ayant un niveau d'énergie restante supérieur ou égal à l'énergie résiduelle moyenne (ERM) de l'ensemble du réseau en tant que nœud candidat (Eq. (4.5)).

$$ERM = \frac{\sum_{i=1}^N E(n_i)}{N} \quad (4.5)$$

Où $E(n_i)$ représente l'énergie restante actuelle du nœud vivant i et N représente le nombre total de nœuds vivants.

Le nœud puits exécute notre fonction objectif sur les nœuds candidats pour choisir 25% des nœuds candidats comme nœud Cluster Head.

La fonction objective utilisée pour sélectionner le meilleur Cluster Head est:

$$g(i) = \beta \times g_1(i) + (1 - \beta) \times g_2(i) \quad (4.6)$$

Où β est utilisé pour contrôler la contribution de chacun des sous-objectifs g_1 et g_2 .

La fonction $g_1(i)$ est utilisée pour minimiser le rapport de la distance euclidienne moyenne des nœuds ordinaires à leur Cluster Head associé.

$$g_1(i) = \min_{m=1,2,\dots,m} \left\{ \sum \frac{d(n_i, CH_m)}{|C_k|} \right\} \quad (4.7)$$

Où $d(n_i, CH_m)$ est la distance euclidienne entre le nœud i et son Cluster Head CH_k et $|C_k|$ est le nombre de nœuds qui appartiennent au cluster C_k

The function f_2 is to minimize the ratio of the total energy of all the ordinary nodes and the total current energy of the CHs in the current iteration:

La fonction $g_2(i)$ est utilisée pour minimiser le rapport entre l'énergie totale de tous les nœuds ordinaires et l'énergie restante totale des CHs dans l'itération courante:

$$g_2(i) = \min_{m=1,2,\dots,m} \left\{ \sum \frac{\sum_{i=1}^m E(n_i)}{\sum_{i=1}^m E(CH_p)} \right\} \quad (4.8)$$

Lorsque les CHs sont choisis, les nœuds ordinaires décident quel cluster se joindre en fonction de la puissance des signaux reçus des CHs. Chaque nœud ordinaire transmet une

demande de jonction au CH choisi en utilisant un protocole MAC CSMA (Carrier Sense Multiple Access). Après avoir reçu des demandes de tous les nœuds qui se joignent, chaque CH alloue une durée de temps selon la technique TDMA (Time Division Multiple Access) à chaque membre du cluster pour établir un lien de communication, afin que le nœud passe en mode veille pour le reste du temps.

4.3.4.2 Phase de construction de chaîne

Après avoir sélectionné les meilleurs CHs, la phase de construction de chaîne aura lieu. Dans cette phase le nœud puits crée une chaîne entre les différents CHs pour transmettre les données vers le nœud puits. D'abord le CH le plus éloigné au nœud puits est choisi comme le nœud de tête de la chaîne. Et selon la distance entre les CHs, la chaîne sera créée. Le nœud CH le plus proche au nœud puits est choisi comme nœud leader de la chaîne.

La distance euclidienne est utilisée pour calculer la distance entre les nœuds CHs et entre les nœuds CHs et le nœud puits.

$$dist = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4.9)$$

Où x_i et y_i (respectivement x_j et y_j) sont les coordonnées du nœud CH $_i$ (respectivement CH $_j$ ou SB).

4.3.4.3 Phase de transmission de données

Dans cette phase, les nœuds membres envoient ces données collectées vers le nœud CH associé, ce dernier agrège les données reçues avec ses données. Puis chaque CH transmet leurs paquets de données via la chaîne jusqu'à le leader de la chaîne puis vers le nœud puits.

4.4 Simulation

Nous avons effectué une série de simulation afin de démontrer l'efficacité énergétique de notre solution. Dans ce qui suit, nous allons énumérer les paramètres de simulation et citer les différentes métriques d'évaluation. Puis, nous allons analyser et discuter les résultats de simulation.

4.4.1 Paramètres de simulation

Le Tableau 4.1 résume les différents paramètres utilisés dans notre simulation.

Tableau 4. 2 : Paramètres de simulation utilisés

Paramètres	Valeurs
Taille du réseau	100*100 m ²
Nombre de nœuds	100
Coordonnée de SB	(50,15)

Énergie initiale (E_0)	0.1 J/node
E_{elec}	50 nJ/bit
Taille des paquets	4000 bits
Nombre de paquets envoyés par itération	1
ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²
ϵ_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
Energie de l'agrégation de données (EDA)	5 nJ/bit
Valeur de β	0,5

4.4.2 Métriques de simulation

Afin de tester l'efficacité énergétique de notre solution, nous avons considéré les métriques suivantes:

- Durée de vie du réseau: Nous avons calculé la durée de vie du réseau en termes de nombre d'itérations depuis le lancement du protocole jusqu'au le dernier nœud mort (jusqu'à tous les nœuds sont morts).
- Energie résiduelle : L'énergie résiduelle est définie comme la somme totale de l'énergie disponible dans le réseau de capteurs par rapport à la durée de vie du réseau.
- Nombre des nœuds vivants par itération.
- Nombre des nœuds morts par itération.

4.4.3 Résultats de simulation

Les nœuds sont déployés d'une manière aléatoire sur une interface de (100x100) m². La figure 4.3 illustre la zone de déploiement de des différents nœuds.

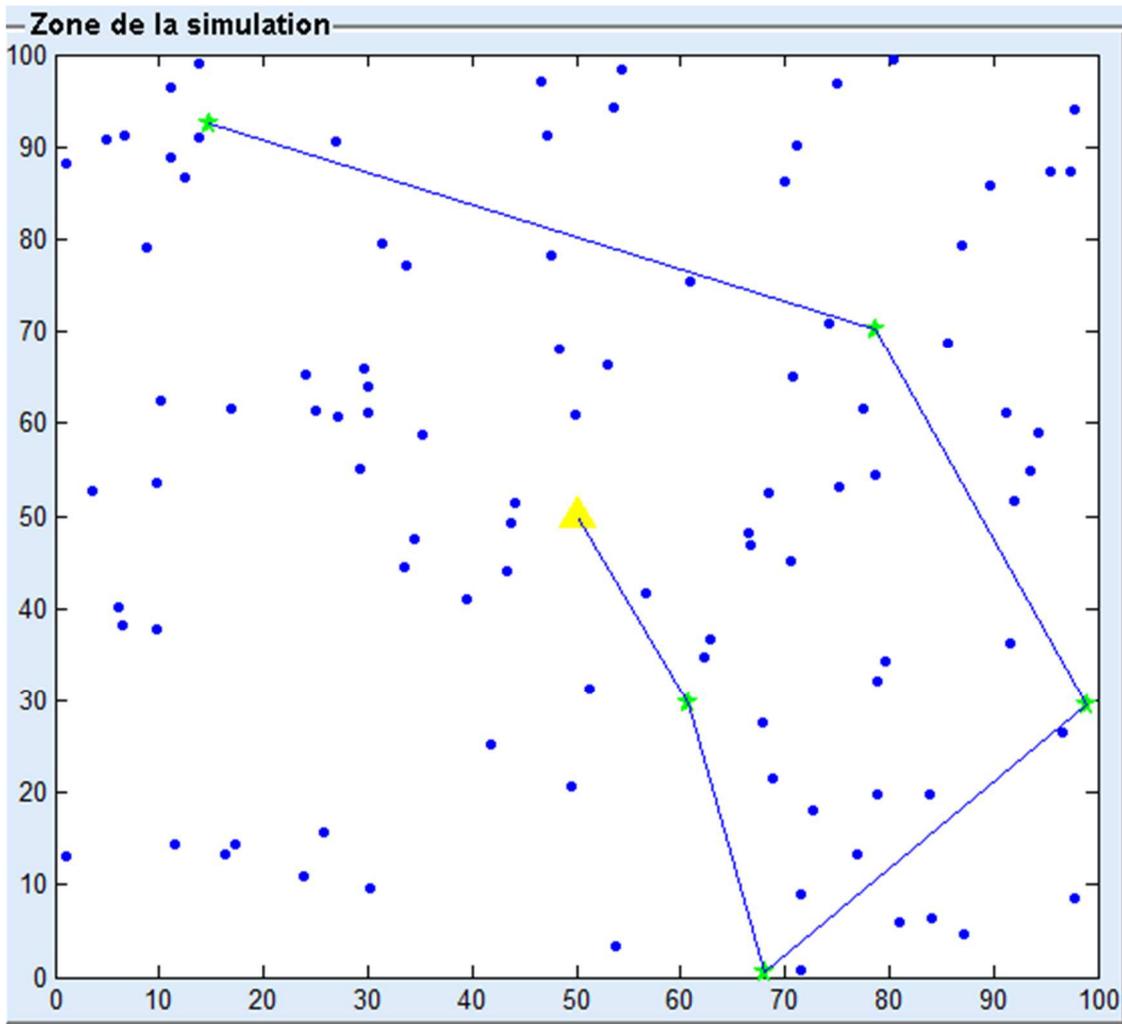


Figure 4. 3: Zone de simulation (Déploiement des capteurs dans le réseau).

Les résultats montrés ci-dessous représente la moyenne de 20 testes effectués en utilisant les même paramètres cité dans le tableau 4.2. Une comparaison a été faite avec le protocole LEACH-C [64] qui aussi un protocole centralisé.

4.4.3.1 Résultats

La figure 4.4 montre les différents résultats de simulation obtenus après l'exécution de notre solution.

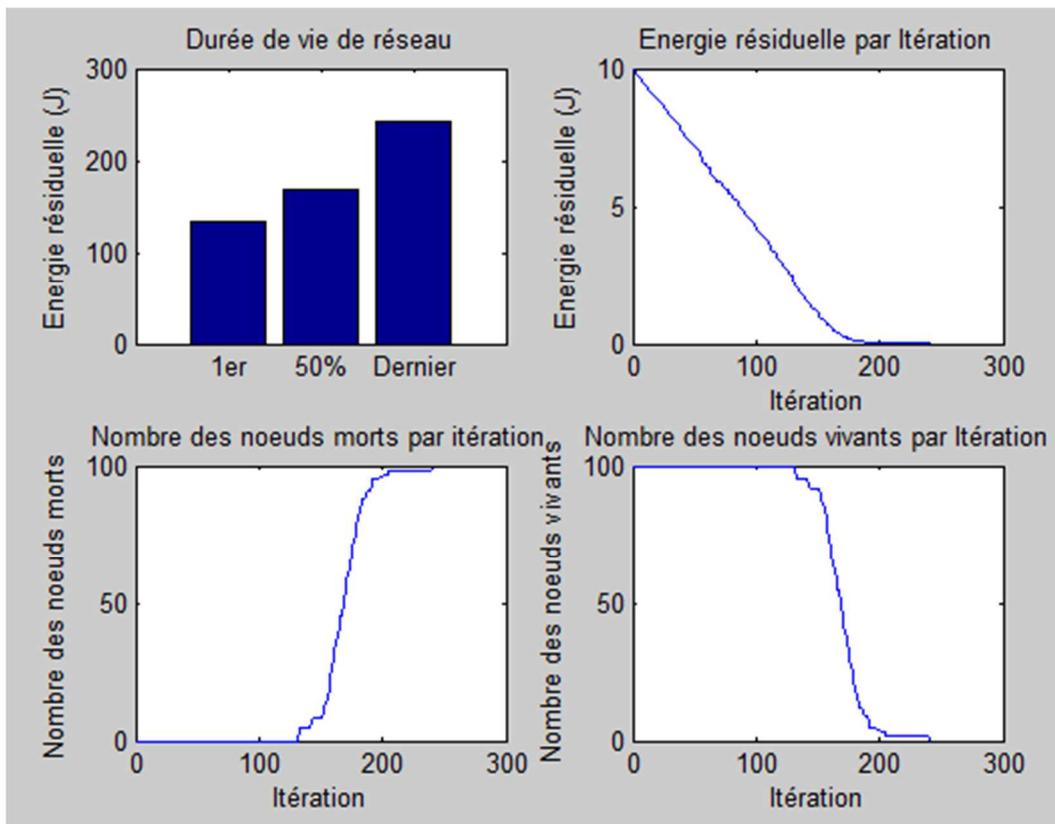


Figure 4. 4 : Résultats de simulation de notre solution

La figure 4.5 montre les différents résultats de simulation obtenus après l'exécution de protocole proposé.

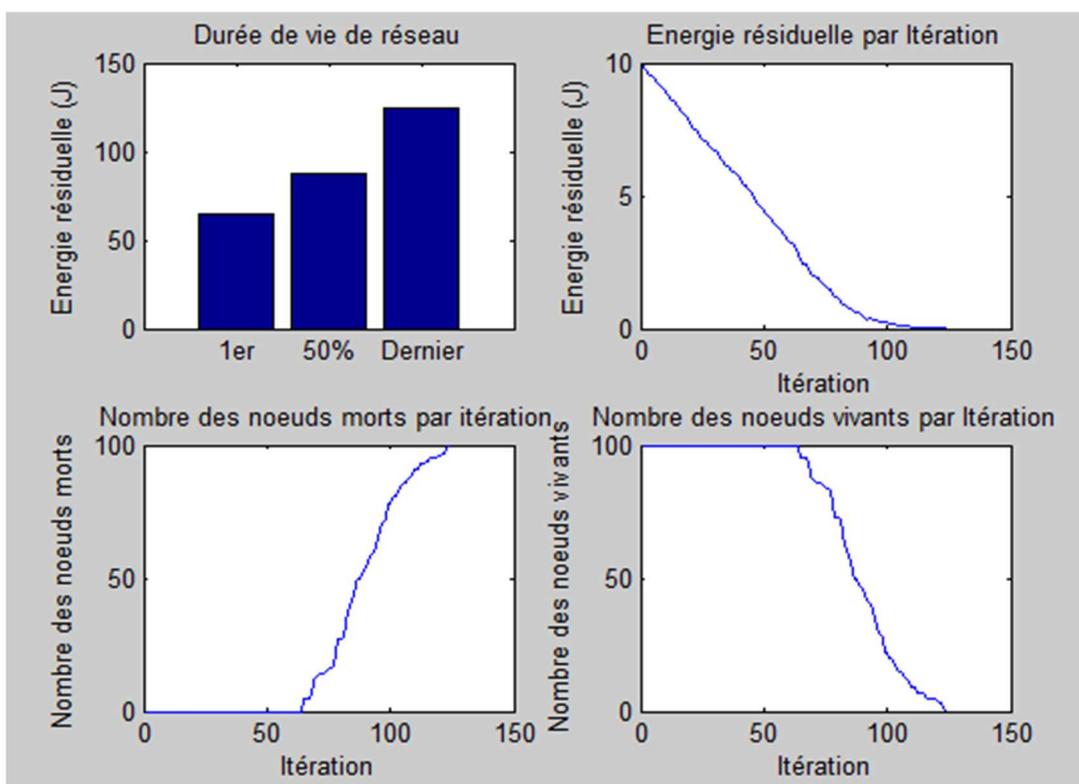


Figure 4. 5 : Résultats de simulation de protocole LEACH[C].

4.4.3.2 Analyses de résultats

Le résultat de la simulation illustré dans les figures 4.4 et 4.5 montre que notre solution consomme moins d'énergie avec l'évolution des itérations par rapport au protocole LEACH-C et cela affecte positivement sur la durée de vie du réseau. Ici, nous observons clairement notre solution proposée est plus performant que le protocole LEACH-C en termes d'optimisation de la durée de vie du réseau.

D'après ces résultats de la simulation, nous pouvons constater que le nombre des nœuds vivants diminue avec l'évolution des itérations pour les deux solutions. Mais pour notre solution, il reste des nœuds vivants jusqu'à l'itération 250. Contrairement au protocole LEACH-C dont les nœuds sont totalement morts après l'itération 125. Nous observons également que le premier nœud meurt dans le protocole LEACH-C après environ l'itération 60, mais après environ l'itération 130 dans notre solution proposée.

Donc, nous pouvons déduire que notre solution présente un rendement plus élevé en termes d'énergie consommée et de la durée de vie globale du réseau par rapport au protocole LEACH-C. Cela est dû à l'efficacité de notre stratégie utilisée pour sélectionner les meilleurs CHs ainsi qu'à la technique utilisée (construction une chaîne entre les différents CHs) pour la transmission des données entre les CHs et les nœuds puits.

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit en détail notre solution proposée. Ensuite, nous avons présenté notre simulation et les différents résultats obtenus. Enfin, nous avons analysé ces résultats en les comparant avec le protocole LEACH-C.

Conclusion générale.

Conclusion générale

Les réseaux de capteurs sont des réseaux formés d'un grand nombre de nœuds capteurs qui se collabore entre eux pour fournir un service bien déterminé.

La consommation d'énergie est un problème fondamental lorsque les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles ou encore déployés sur de grands espaces. Pour cela, les nœuds limités en termes d'énergie vont avoir un impact sur la durée de vie du réseau tout entier.

Pour minimiser la consommation d'énergie dans le RCSF, nous avons proposé une solution qui se base sur une architecture hiérarchique en combinant les deux structures hiérarchiques: structure hiérarchique en clusters et structure hiérarchique en chaîne afin d'orienter les données collectées de nœuds sources vers la station de collecte (puits).

De notre solution proposée dans le but de minimisation de consommation de l'énergie des nœuds capteurs pour prolonger sa durée de vie (MAC CSMA (Carrier Sense Multiple Access)) nous concluons que notre solution consomme moins d'énergie avec l'évolution des itérations par rapport au protocole LEACH-C et cela affecte positivement sur la durée de vie du réseau. Donc, nous pouvons déduire que notre solution présente un rendement plus élevé en termes d'énergie consommée et de la durée de vie globale du réseau par rapport au protocole LEACH-C. Cela est dû à l'efficacité de notre stratégie utilisée pour sélectionner les meilleurs CHs ainsi qu'à la technique utilisée (construction d'une chaîne entre les différents CHs) pour la transmission des données entre les CHs et les nœuds puits.

Référence

- [1] **F. Baudoi**, «Capteurs : principes et utilisations», Édition Casteilla, Etats-Unis, 2007.
ISBN: 978-2-7135-2749-4.
- [2] **E.P. Freitas, T. Heimfarth, I. F. Netto**, «Enhanced Wireless Sensor Network Setup Strategy Supported by Intelligent Software Agents», Magister theses, Computer Science Department, Federal University of Lavras, Lavras, Brazil.
- [3] **Vernon S. Somerset**, “Intelligent and Biosensors, Edited by Vernon S. Somerset”, Intech, January 2010
- [4] **F. Brissaud, D. Charpentier, A. Barros et C. Bérenguer**, « capteurs intelligents : nouvelles technologies et nouvelles problématiques pour la sureté de fonctionnement », Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Lambda-Mu 16, Avignon : France(2008)
- [5] **D.MARTINS**, Sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil, Stéganographie et réseaux de confiance, Thèse de doctorat, 2010.
- [6] **Datasheettmoteky**:<http://www.eecs.harvard.edu/konrad/projects/shimmer/references/tmote-skydatasheet.pdf>.
- [7] **SAHRAOUI Belkheyr**; La Géo-localisation dans les Réseaux de Capteurs sans Fil; Mémoire de fin d'études; Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, 2010-2011.
- [8] **I.F. AKYILDIZ, W. S. SANKARASUBRAMANIAM, E. CAYIRCI** : Wireless Sensor Networks: A Survey. Computer networks, 2002, 38, pp. 393-422.
- [9] **Melle. REZKI YASMINA Melle. BOURDJAH SIHAM**,« «Etude des mécanismes de localisation dans les réseaux de capteurs sans fil »mémoire de master, Université A/Mira de Béjaia, 2014
- [10] **YOUSSEF BENABBASSI**, « application de la redondance pour la surveillance réseaux de capteurs sans »,Diplôme de Doctorat, université d’Oran,2014

- [11] **J. Joy Winston and B. Paramasivan**, A Survey on Connectivity Maintenance and Preserving Coverage for Wireless Sensor Networks, International Journal of Research and Reviews in Wireless Sensor Networks (IJRRWSN), Vol. 1, No. 2, ISSN : 2047-0037, pp.11-18, June 2011.
- [12] **K. BOUCHAKOUR**. Routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs sans fil :Protocole KhLCH (K hop Layered Clustering Hierarchy). 2012.
- [13] **H. Karl et A. Willig**, “Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks”, John Wiley & Sons, 2005
- [14] **Shio Kumar Singh et al**, “Applications, Classifications, and Selections of Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks”, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGIES (IJAEST), Vol No.1, Issue No. 2, p85 – 95
- [15] **V. R. Syrotiuk, B. Li, and A. M. Mielke**, “Heterogeneous Wireless Sensor Networks” in Algorithms and Protocols for Wireless Ad hoc and Sensor Networks, A. Boukerche, ed., John Wiley & Sons, Inc., 2008, Chapter 2, pp. 21-50.
- [16] **Tseng et Al**. “The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network”, in Wireless Networks, Kluwer Academic Publishers. 8, 153–167, 2002
- [17] **Carlos POMALAZA-REZ**, «Wireless Ad Hoc & Sensor Networks», Technical report, Oulu University, Finland, 2004.
- [18] **K. Holger A. Willig**. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks, Wiley,. 5, 6, 7, 14, 20, 21. 2005.
- [19] **Diery Ngom** ,« Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau »,déploché de doctorat , UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE ,2017

- [20] **Mr BERKANI Ferhat. Mlle HAMMOUI Lamia**, «Le routage hiérarchique sous contrainte d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil », Mémoire de Master université de Bgayet,2014
- [21] Kacimi Rahim, Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse , 2009.
- [22] **C.Y. Chong and S. P. Kumar** ,“Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges”, in Proceedings of the IEEE,2003, vol. 91, No.8, pp. 1247-1256.
- [23]: **YACINE Younes**, « Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs »,Option 'Système informatique', 2012.
- [24] **G. J. Pottie ; W. J. Kaiser**. Wireless integrated network sensors. volume 43 of 5, pages 51–58, 2002.
- [25] **Ozan K. Tonguz and Gianluigi Ferrari**. AD DOC WIRELESS NETWORKS. ISBN 0-470-09110-X 0, WILEY EDITION, 2006.
- [26] **J.Chang and L.Tassiulas**. Energy conserving routing in wireless ad hoc network. In proceedings of .IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), Volume .1, pages.22-31, 2000.
- [27] **I.kang and R.Poovendran**. Maximizing static network lifetime of wireless broadcast adhoc networks. In Proceeding of IEEE International Conference on Communications.(ICC'03), Volume 3, pages 2256 – 2261, ISBN: 0-7803-7802-4, 2003.
- [28] **Keith Hellman and Michael Cologrosso**. Investigating a Wireless sensor network optimal lifetime solution for linear topologies. Journal of interconnection Networks, Volume 7, No 1, pages 91-99,2006.
- [29] **M. Cardei, J. Wu**, “Energy-efficient coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks”, Computer Communications, Vol. 29, No. 4, pp. 413-420, February 2006.

- [30] **S. Meguerdichian**, F. Koushanfar, M. Potkonjak, M. Srivastava, “Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks”, IEEE Infocom 2001, pp. 1380-1387, April 2001.
- [31] **S. Meguerdichian, F. Koushanfar, G. Qu, M. Potkonjak**, “Exposure in wireless ad-hoc sensor networks”, Proc. 7th Annual Int. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCOM 2001), pp. 139-150, July 2001.
- [32] **Li-Hsing Yen, Chang Wu Yu, Yang-Min Cheng**, “Expected k-coverage in wireless sensor networks”, Ad Hoc Networks, Vol. 4, No. 5, pp. 636-650, September 2006.
- [33] **Ji Li, Lachlan L.H. Andrew, Chuan Heng Foh, Moshe Zukerman and Hsiao-Hwa Chen**, Connectivity, Coverage and Placement in Wireless Sensor Networks, Sensors 9, no 10, pp. 7664-7693, 2009.
- [34] **W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan**, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro sensor Networks”, in proceedings of the Hawaii International Conference on SystemScience, vol. 8, January 2000, pp. 1-10.
- [35]: **Malick GAYE**, Etat de l’art sur les WSN (Wireless Sensor Network), Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Juin 2014.
- [36] **Cesare Alippi, Giuseppe Anastasi, Cristian Galperti, Francesca Mancini, and Manuel Roveri**. Adaptive sampling for energy conservation in wireless sensor networks for snow monitoring applications. In Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS'07), pages 16, Pisa, Italy, October 2007. 14, 29
- [37] **Mahmood Ali, Annette Böhm, and Magnus Jonsson**. Wireless sensor networks for surveillance applications - A comparative survey of MAC protocols. In Proceedings of the 4th International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC '08), pages 399403, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society. 14
- [38] **K. Holger and Andreas Willig**. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Wiley, 2005. 5, 6, 7, 14, 20, 21

- [39] **Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin.** Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(3) :493506, 2004. 14, 16, 26
- [40] **M. YOUNIS, T. NADEEM,** «Energy efficient MAC protocols for wireless sensor networks», Rapport technique, Mryland Baltimore pays University, USA, 2004.
- [41] **M. Ilyas and I. Mahgoub.** Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems, ISBN 08493196864. CRC PRESS LLS, USA, 2005.
- [42] **H. NAMGOOG, D. LEE, D. NAM,** «Energy efficient topology for wireless micro-sensor networks», ACM, PE-WASUN, October 2005.
- [43]: **KECHAR Bouabdellah,** Problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Doctorat, Université d'Oran, 13 / 07 / 2010.
- [44] : **Wikipédia.**
- [45] : **Mehdi BOUALLEGUE,** Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Doctorat, L'Université Bretagne Loire, 2016.
- [46]:**A. E. Kamal J.N. Alkaraki.** Routing Techniques in Wireless Sensor Network: A Survey Dept. of Electrical and Computer Engineering Iowa State University, Ames Iowa 50011,2005.
- [47]: **X et al Ji.** Sensor Positioning in Wireless Ad hok sensor Networks with Multidimensional Scaling, Proc. Infocom.2004.
- [48]: **K. BEYDOUN.** Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs. Thèse de doctorat U.F.R des sciences et techniques. l'université de Franche-Comté,2
- [49]: **H.Balakrishnan A.Chandrakasan, W.Heinzelman.** Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks. Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, 2000.

- [50]: **S.Lindsey C.S.Raghavendra. PEGASIS** :power efficient gathering in Sensors Information Systems .IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems,vol.13,no.9,pp.924-953,. September 2002.
- [51] **O. Younis, S. Fahmy.**, Heed : A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks., IEEE Transactions on Mobile Computing 03 (4). 2004, pp. 366-379.
- [52]: **A. Al KARAKI E.KAMAL.** Routing techniques in wireless sensor networks : A Survey .magazine : IEEE communication,vol 11 N6, pp.6.28. microStrain, Inc, 2004
- [53]: **N. THEPVILOJANAPONG.** A study on data collection and mobility control for wireless sensor networks. Thèse de doctorat. Departement Information et Ingenierie de Communi- cation, Université de Tokyo, Japan, Decembre 2005.
- [54]: **B. KRISHNAMACHARI D. ESTRIN and S.WICKER.** Modelling data-centric routing in wireless sensor networks,. In Proceedings of the IEEE INFOCOM, 2002.
- [55] **D. Braginsky and D. Estrin,**“Rumor Routing Algorithm for sensor network”, in the approach of the first workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta GA, Octobre 2002.
- [56] **C. Intanagonwiwat, R. Govindan et D. Estrin,** Directed diffusion : A scalable and robust communication paradigm for sensor networks, Proceedings ACM MobiCom’00, pp. 56- 67, Boston, MA, Août 2000.
- [57]: **A.P. Chandrakasan W. Heinzelman and H. Balakrishnan.** An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks, In IEEE Transactions on Wireless Communications,Vol. 1, No. 4, pp. 660-670. 2002.
- [58] **Yaser Yousef,** Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Doctorat Spécialité informatique, université de haute alsace, 2010.

[59]: **R.JURDAK**. wireless Ad hoc and sensor networks A Cross-layer design perspective. university college Dublin, 2007.

[60] **Y. Yao and J. Gehrke**, “The cougar approach to in-network query proceeding in sensor network”, in SIGMOD, September 2002.

[61] **P. Agarwal and C. Procopiuc.**, Exact and Approximation Algorithms for Clustering., In Proceedings of the Ninth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, pages 658- 667, January 1999

[62] **E. Manjeshwar and D. P. Agrawal**, “APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks”, in IPDPS’02, 16th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2003, pp. 48.

[63] **<https://fr.wikipedia.org/wiki/MATLAB>**

[64] **H. Dhawan, S. Waraich**, "A comparative study on LEACH routing protocol and its variants in wireless sensor networks: A survey", *International Journal of Computer Applications*, vol. 95, no. 8, pp. 21-27, 2014.